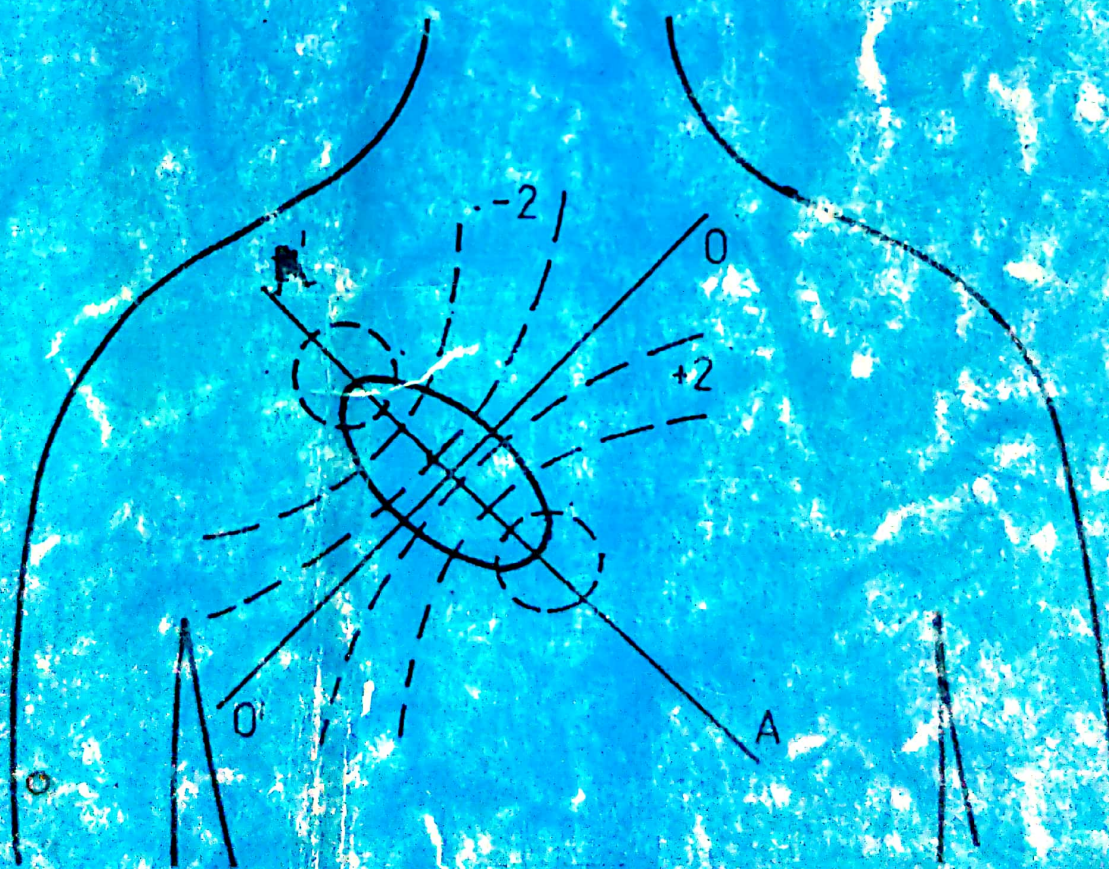


SERVILIA OANCEA
ALINA RÂPĂ ION OANCEA

Introducere în BIOFIZICĂ



TEKNOPRESS

Alina Râpă

Servilia Oancea

Ion Oancea

Introducere în BIOFIZICĂ

Dreii Alina Teodor, care timp de un
semestru, a căutat să învețe cu sârguință
să mănușească aparatele din laborator și
să înțeleagă fenomenele complicate pe care
biofizica încearcă să le explice.

Ion

EDITURA TEHNOPRESS

Str. Zimbrului nr.17

6600 Iași – România

Tel. : 125266

Fax : 239436

E-mail : tehnopress@k.ro

ISBN 973-8048-05-2

Servilia Oancea

Alina Râpă

Ion Oancea

Introducere in **BIOFIZICĂ**

EDITURA TEHNOPRESS
Iași - 2000

CUPRINS

INTRODUCERE. BIOFIZICA. OBIECTUL ȘI EVOLUTIA ISTORICA	5
Obiectul biofizicii	9
Evolutia istorica a biofizicii	11
Principiul complementarității biologice	12
CAPITOLUL I. FLUIDE BIOLOGICE	15
I.1 Caracteristici generale ale fluidelor	15
I.2. Legea fundamentală a statisticii fluidelor	17
I.3. Aplicații ale legii fundamentale a staticii lichidelor	19
I.3.1. Presiunea hidrostatică.	19
I.3.2. Legea lui Arhimede	20
I.4. Dinamica fluidelor	21
I.4.1 Ecuația de continuitate	21
I.4.2. Ecuația lui Euler	22
I.4.3 Aplicații ale legii lui Euler	23
* I.5. Fluide vâskoase	27
I.6. Ecuațiile Navier-Stokes	28
* I.7. Legea Hagen- Poiseuille	29
I.8. Legea lui Stokes.	31
* I.8.1. Curgere laminară și turbulentă.	32
* I.9. Vâscozitatea lichidelor newtoniene	33
I.10. Noțiuni de hemoreologie	34
* I.10.1. Fenomenul Fahraeus – Lindqvist	35
I.11. Concluzii și observații privind curgerea lichidelor în organism	36
* I.12. Fenomene de suprafață și de contact	36
* I.12.1 Tensiunea superficială	36
* I.12.2 Fenomene de contact. Capilaritatea.	38
* I.13. Difuzia	39
* I.14. Osmoza.	42
* I.15. Echilibrul osmotic pentru sistemele vii	44
* I.16. Presiunea osmotică a lichidelor din organismul uman și animal	45
CAPITOLUL II. FORȚE INTERATOMICE ȘI INTERMOLECULARE	49
II.1. Forțe interatomice de legătură (de atracție)	50
II.1.1. Legătura ionică	50
II.1.2. Legătura covalentă	51
II.1.3. Structura moleculei de apă	54

II.1.4. Hibridizarea orbitalilor	55
II.1.5. Legătura metalică	56
II.2. Forțe intermoleculare	57
II.2.1 Legăturile de tip Van der Waals	57
II.2.2 Legătura de hidrogen	57
II.3. Interacțiunea hidrofoba	58
CAPITOLUL III. METODE DE STUDIU IN BIOFIZICA	59
✗ III.1. Sedimentarea, difuziunea, ultracentrifugarea.	59
✗ III.1.1. Sedimentarea	59
✗ III.1.2. Difuziunea	60
✗ III.1.3. Ultracentrifugarea	62
✗ III.2. Electroforeza.	64
✗ III.3. Rezonanța electronică de spin (RES)	64
✗ III.3.1. Proprietățile magnetice ale atomilor	64
✗ III.3.2. Rezonanța paramagnetică electronică sau rezonanța electronică de spin. (RES)	67
✗ III.4. Rezonanța magnetică nucleară	70
III.4.1. Proprietăți magnetice ale nucleului.....	70
✗ III.5. Studiul substanțelor solide cu metoda de difracție cu raze X	73
✗ III.5.1. Spectrele de raze X.	73
III.5.2. Rețele cristaline.....	74
III.5.3. Analiza de structură cu raze X	76
CAPITOLUL IV. TERMODINAMICA BIOLOGICA	79
✗ IV.1 Sisteme termodinamice	79
✗ IV.2. Principiile termodinamicii	80
✗ IV.2.1 Principiul 0 al termodinamicii	80
✗ IV.2.2. Principiul I al termodinamicii	80
✗ IV.2.3. Principiul I al termodinamicii pentru sistemele biologice	82
✗ IV.2.4. Principiul al II-lea al termodinamicii	83
✗ IV.2.5. Ciclul Carnot	84
✗ IV.2.6. Principiul al III-lea al termodinamicii	85
IV.2.7. Capacități calorice	86
✗ IV.3. Căldura animală. Termogeneza și termoreglarea	87
✗ IV.4. Potentiale termodinamice	88
✗ IV.5. Principiul al II-lea al termodinamicii pentru procese ireversibile	90
✗ IV.5.1 Entropie și ordine	92
IV.6. Termodinamica sistemelor vii	93
IV.6.1. Sistemele biologice ca structuri disipative	95
✗ IV.6.2. Termodinamica sistemelor liniare	95
IV.6.3. Cuplajul fluxurilor	95
IV.6.4. Stările staționare ale sistemelor liniare.....	97
IV.6.5. Teorema Prigogine Glandsdorf.	97

~~X~~ IV.6.6 Procese departe de echilibru	100
IV.6.7. Evoluția sistemelor termodinamice departe de echilibru	102
IV.6.8. Evoluția sistemelor chimice și biologice cu autoorganizare	103
IV.7. Considerații filozofice.	104
CAPITOLUL V . MEMBRANE BIOLOGICE	106
~~X~~ V.1. Structura și funcțiile membranei	106
~~X~~ V.2. Clasificarea proceselor de transport	109
~~X~~ V.3. Transportul pasiv	110
~~X~~ V.3.1. Difuzia simplă	110
~~X~~ V.3.2. Difuziunea facilitată	111
~~X~~ V.3.3. Difuzia simplă mediată de proteine canal	112
~~X~~ V.4. Transportul activ prin membranele biologice	113
~~X~~ V.4.1. Transportul activ primar	113
~~X~~ V.4.2. Pompa de Na și K	115
~~X~~ V.4.3. Pompa de calciu	116
~~X~~ V.5. Echilibrul osmotic	117
~~X~~ V.6. Potențialul Nernst și echilibrul ionic.	119
~~X~~ V.7. Echilibrul Donnan	120
CAPITOLUL VI. FENOMENE BIOELECTRICE	122
~~X~~ VI.1. Potențialul de repaos celular	122
~~X~~ VI.1.1 Schema electrică echivalentă a membranei celulare	123
~~X~~ VI.2. Biofizica propagării influxului nervos	124
~~X~~ VI.2.1 Proprietățile potențialului de acțiune	126
~~X~~ VI.2.2 Explicarea apariției potențialului de acțiune	126
~~X~~ VI.3. Propagarea excitației în fibrele nervoase	128
VI.4. Concluzii	129
~~X~~ VI.5. Parametrii sistemelor excitabile	130
~~X~~ VI.6. Bioelectrogenza țesuturilor și organelor	131
~~X~~ VI.6.1. Potențialul electric al unui dipol	132
~~X~~ VI.6.2. Electrocardiograma.	134
VI.6.3. Activitatea bioelectrică a creierului	136
CAPITOLUL VII. ELEMENTE DE BIOMECHANICA	138
VII.1. Mecanismul contracției musculare	138
VII.2. Termodinamica contracției musculare.	140
VII.3. Mișcarea prin cili, flageli și amiboidală	142
CAPITOLUL VIII. ANALIZATORII	143
~~X~~ VIII.1. Analizatorul vizual	143
~~X~~ VIII.1.1. Ochiul	143
~~X~~ VIII.1.2. Formarea imaginii în ochiul redus	144
~~X~~ VIII.1.3. Biofizica vederii	145
~~X~~ VIII.2. Analizatorul auditiv	150
~~X~~ VIII.2.1 Sunetul și calitățile sunetului.	150

VIII.2.2. Absorbția sunetului	152
VIII.2.3 Structura analizatorului auditiv	153
VIII.2.4. Biofizica auzului.	156
CAPITOLUL IX. ACȚIUNEA RADIAȚIILOR	
ASUPRA ORGANISMELOR	158
IX.1 Spectrul radiațiilor neionizante	158
IX.1.1. Spectre atomice și moleculare	158
IX.1.2. Acțiunea radiațiilor neionizante asupra organismului animal.	161
IX.1.2.1. Efectele microundelor și radiofrecvențelor asupra organismelor	161
IX.1.2.2. Efectul radiațiilor infraroșii asupra organismelor.	162
IX.1.2.3. Efectul radiațiilor luminoase asupra organismelor. ...	162
IX.2. Acțiunea radiațiilor ionizante asupra organismelor	163
IX.2.1. Dezintegrarea radioactivă. Radiațiile nucleare	163
IX.2.2. Tipuri de radiații nucleare	164
IX.2.3. Legile dezintegrării radioactive	164
IX.2.4. Sisteme și unități de măsură pentru dozele de radiații	166
IX.2.5. Efectul radiațiilor ionizante asupra funcțiilor celulare ..	167
IX.2.6. Efectul radiațiilor ionizante asupra diferitelor organe ..	168
IX.2.7. Efectele radiațiilor ionizante asupra glandelor endocrine	168
IX.2.8. Efecte genetice ale radiațiilor ionizante.	169
IX.2.9. Evaluarea efectelor radiațiilor ionizante în scara animală	170
IX.3. Diagnosticul și terapia cu radioizotopi	171
IX.4. Protecția împotriva radiațiilor ionizante	172
ANEXE	175
Anexa 1	175
Anexa 2	176
Anexa 3	177
Anexa 4	180

PREFATA

Cartea de față este o introducere în biofizica medicală și se adresează în special studenților de la Medicină veterinară și Zootehnie din Universitățile Agronomice. În același timp unele capitole pot fi de folos studenților de la facultățile cu profil biologic precum și studenților care studiază biofizica în cadrul unor secții de alt profil.

Cartea începe cu o scurtă introducere în care am prezentat ce este biofizica și care sunt domeniile ei de cercetare. Ea cuprinde nouă capitole, conținând cele mai importante fenomene care se studiază în biofizică, fiecare fiind tratat succint, dat fiind faptul că este un manual care se adresează unor studenți ce au alocat un număr foarte redus de ore acestei discipline.

În primul capitol sunt studiate principalele fenomene legate de curgerea lichidelor care au aplicații în domeniul hemoreologiei. Apoi sunt prezentate principalele forțe interatomice și intermoleculare care apar în compușii biologici, precum și cele mai folosite metode de studiu în domeniul biofizicii.

Termodinamica proceselor biologice, care sunt procese ireversibile este subiectul unui alt capitol. Sunt prezentate o serie de fenomene cum sunt termogeneza și termoreglarea dar și aspecte legate de evoluția sistemelor biologice, sisteme cu autoorganizare. Ținându-se cont de faptul că fenomenele de transport prin membranele biologice sunt prezentate la altă disciplină, aici sunt studiate mecanismele fiecărui tip de transport, atât pentru cel pasiv cât și pentru cel activ.

Manualul cuprinde în continuare aspecte legate de bioelectrogenza și de metodele de investigație în acest domeniu (EKG, EEG, etc.). De asemenea sunt prezentate succint câteva noțiuni de biomecanică, în special mecanismul contracției musculare. Caracteristicile celor mai importanți analizatori, ochiul și urechea sunt prezentate de asemenea în cuprinsul acestei cărți.

Cartea se încheie cu elemente ale efectelor factorilor de mediu asupra organismului animal, insistându-se asupra efectele radiațiilor nucleare care sunt deosebit de nocive atât pentru om cât și pentru animale.

Aparatul matematic folosit este elementar, el presupunând cunoștințe minime de algebră și analiză matematică, dobândite de către studenți în timpul liceului.

Având în vedere că este primul manual de biofizică scris de autori, care nu au o experiență mare în acest domeniu, ne exprimăm pe această cale mulțumirile tuturor celor care ne vor face observații asupra conținutului sau vor corecta erorile făcute fără voia noastră.

Autori

INTRODUCERE.

BIOFIZICA - OBIECTUL ȘI EVOLUȚIA ISTORICĂ

Obiectul biofizicii

Biofizica este o disciplină relativ nouă, având ca obiect de studiu un domeniu interdisciplinar de fapt, ce cuprinde aspecte legate de științele biologice, pe de o parte și de științele fizice și matematice, pe de altă parte.

Deci biofizica studiază fenomenele fizice care stau la baza funcționării sistemelor biologice.

De aceea ea folosește tehnicile fizico-chimice precum și aparatul matematic pentru cercetarea fenomenelor fizice ale lumii vii.

Biofizica, abordează următoarele probleme :

- 1) studiul fenomenelor fizice care stau la baza fenomenelor biologice
- 2) cercetarea efectelor biologice ale factorilor fizici ambianți
- 3) folosirea tehnicilor fizice în abordarea problemelor biologice.

Privită ca fizică aplicată (așa cum este și meteorologia de exemplu), biofizica utilizează, pentru explicarea fenomenelor biologice, multe capitole ale fizicii.

Astfel, de exemplu biomecanica se ocupă de aspectele mecanice începând de la locomoția animală până la proprietățile mecanice ale componentelor celulare. Biotermodinamica se ocupă de conversia energiei, de sistemele termodinamice deschise iar fenomenele electrice au cea mai deplină aplicabilitate în studiul unor procese biologice ce constituie punctul de plecare al unor investigații clinice.

Procesele celulare își găsesc explicația pe baza cunoștințelor de mecanică cuantică, fizica corpului solid și mai ales fizica stării lichide, starea lichidă ocupând un loc aparte în componența materiei vii.

Legat de nivelul de organizare al sistemului biologic studiat s-au dezvoltat diferite ramuri ale biofizicii cum ar fi biofizica moleculară care studiază proprietățile moleculelor, ale materiei vii, biofizica celulară care se ocupă cu proprietățile mecanice, termice, electrice ale celulelor, biofizica sistemelor complexe, etc.

Legătura dintre diferitele forme de mișcare ale materiei, ce derivă din diversitatea formelor ei de existență a făcut necesară apariția unor științe de graniță, sau interdisciplinare, așa cum este biofizica sau biochimia. Metodele de cercetare proprii fizicii se aplică pentru studiul sistemelor chimice și biologice.

În lumea vie găsim o legătură foarte strânsă între fenomenele fizice și chimice, pe de altă parte.

Viața însă nu poate fi redusă la aspectele fizico-chimice ale materiei vii, dar fără cunoașterea acestor aspecte nu este posibilă înțelegerea vieții.

Studiul fenomenelor naturii a arătat că acesta cuprinde o varietate de domenii, ale căror ordine de mărime în metri, sunt date în tabelul de mai jos.

10^{26}	raza universului
10^{24}	superroiuri de galaxii
10^{22}	roiuri de galaxii
10^{20}	raza galaxiei
10^9	Soarele
10^7	Pământul
10^4	stele neutronice(pulsari)
10^2	zgârie nori
10^1	case
1	Omul
10^{-1}	șoarecele
10^{-2}	cireașa
10^{-3}	puricele
10^{-4}	grăuntele de nisip
10^{-5}	celula sanguină
10^{-6}	virus animal
10^{-7}	bacteria
10^{-8}	molecula mare
10^{-9}	molecula de zahăr
10^{-10}	atom

10^{-15} nucleul atomic

10^{-16} neutroni, protoni

10^{-19} electroni, quarci

10^{-21} preoni, rişoni ? ? ?

Domeniul de cercetare al biofizicii este foarte vast, începând cu nivelul atomic continuând apoi cu moleculele, celulele şi terminând cu omul.

Evolutia istorica a biofizicii

Deşi are un caracter interdisciplinar, şi după cum am arătat, este relativ nouă, primele cercetări în domeniul care astăzi îl cuprinde biofizica, au fost făcute de aproximativ două secole în urmă.

Originele biofizicii le putem considera studiile de biomecanică ale lui Leonardo da Vinci asupra zborului păsărilor. Cercetările privind bioelectricitatea efectuate de Luigi Galvani asupra efectului electricităţii statice a muşchiului de broască şi Alexandru Volta pot fi considerate însă ca început al cercetărilor de biofizică.

În secolul al XIX-lea mari fiziologi ai lumii au efectuat cercetări de biofizică. Amintim cercetările lui Hermann Helmholtz privind contracţia musculară şi transmiterea influxului nervos şi care apoi a dezvoltat teoria lui Young asupra vederii colorate şi asupra percepţiei sunetelor muzicale. A conceput şi dezvoltat instrumente de analiză a sunetelor pentru oftalmologie.

Un aport deosebit îl are medicul german J. Mayer în aprofundarea principiului I al termodinamicii privind conversia energiei dintr-o formă în alta.

Descoperirea radiaţiei X în 1895 de către Rontgen, a deschis calea celor mai spectaculoase aplicaţii în biologie şi medicină, dintre care cea mai importantă este radiologia.

În sfârşit, descoperirea radioactivităţii naturale şi apoi a celei artificiale de către Becquerel şi P. şi Marie Curie, cât şi obţinerea ulterioară a izotopilor radioactivi care se folosesc în cele mai variate domenii, fac uneori ca biofizica să se confunde cu radiobiologia (care este ştiinţa legată de aplicaţiile acestor izotopi radioactivi). De fapt acesta este domeniul în care rezultatele ştiinţifice adunate sunt impresionante şi în acelaşi timp domeniul este şi productiv. În prezent explorările funcţionale folosesc frecvent terapia cu radioizotopi, iar pe de altă parte utilizarea acestora în mutaţii genetice poate permite obţinerea unor mutanţi cu eficienţă economică mare.

Un alt domeniu al biofizicii în care se lucrează foarte mult (pe lângă cel al radioizotopilor) este cel al fenomenelor electrice care însoţesc activitatea celulelor şi a organelor excitabile ce permit aprofundarea cunoştinţelor despre funcţiile acestora. Aceasta a permis dezvoltarea unor metode de investigaţii cum sunt electrocardiografia, electroencefalografia, etc, fără de care în prezent în medicină nu se face nici o intervenţie chirurgicală, de exemplu.

Pornind de la rolul activ al membranelor biologice, studiul fenomenelor de membrană din sistemele biologice a căpătat în ultimii ani o amploare deosebită, astfel că acestea și-au găsit explicații în cele mai diverse domenii pornind de la electrozii selectivi (membrane permeabile pentru anumiți ioni), continuând cu rinichiul artificial (hemodializorul), și până la instalații de desalinizare a apei de mare sau de ultrafiltrare a rezidurilor industriale.

Pe lângă cele trei domenii mari prezentate mai sus în care biofizica a contribuit în mod esențial, există și alte domenii conexe cum ar fi cel al biopolimerilor, cel al geneticii moleculare, al biociberneticii etc.

Rezultatele cercetărilor de biofizica sunt spectaculoase (și dovada acestui fapt o reprezintă numărul mare de premii Nobel acordate în cercetări cu caracter incontestabil de biofizica), iar în același timp extrem de laborioase și de delicate dat fiind că acestea sunt greu de realizat în laborator.

În același timp ele necesită atât metodologie performantă cât și un aparat matematic foarte complex.

Premiul Nobel în 1991 pentru medicină a fost acordat biofizicienilor germani Neher și Sakmann pentru tehnica "patch clamp" pentru înregistrarea activității unui singur canal ionic din membrana celulară (măsurători ale curenților ionici care sunt de ordinul picoamperilor!).

Principiul complementariității biologice

Deși multe din procesele moleculare ale sistemelor vii sunt recunoscute, există încă multe necunoscute, datorită diferenței dintre lumea vie și celelalte fenomene. În ciuda progreselor științifice fenomenul desemnat de formula "lumea vie" este greu de definit și încă și mai greu de studiat. Evoluția de la forme relativ simple la o diversitate complexă, pare să contrazică principiul al II-lea al termodinamicii. Toate sistemele biologice sunt sisteme deschise, viața nefiind posibilă fără un schimb continuu de substanță și energie cu mediul ambiant. Sistemul biologic preia din mediul înconjurător energie pe care o utilizează în mod specific pentru a se dezvolta în continuare prin reproducere.

În 1949 Max Delbruck ține niște lecții în care descrie biologia din punct de vedere fizic. Legat de evoluția spre procese mai complicate și de greutatea studiilor sistemelor biologice el arată că un organism de astăzi este determinat de un bilion de ani de evoluție, deci de o multitudine de factori, spunând că "nu te poți aștepta să explici așa de bine o pasăre bătrână în câteva cuvinte".

Niels Bohr a considerat că organismele sunt inepuizabile. El a introdus în biologie un principiu de incertitudine asemănător celui din mecanica cuantică dat de relațiile de incertitudine Heisenberg, dar la un nivel mai înalt, cunoscut sub denumirea de principiul complementarității în biologie.

Dacă în mecanica clasică, mișcarea unei particule este complet determinată dacă, pe lângă forțele care acționează asupra ei, se cunoaște poziția și impulsul la momentul inițial, în cazul microparticulelor, poziția și impulsul nu se pot determina mai precis decât permite principiul de nedeterminare a lui Heisenberg exprimat prin relația

$$\Delta p \Delta x \geq h$$

În această relație Δp_x este imprecizia în componenta după direcția x a impulsului particulei, Δx imprecizia în determinarea coordonatei sale, h este constanta lui Planck ($h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$). Conform acestui principiu niciodată nu se pot determina, la un moment dat, valorile coordonatei și impulsului cu orice exactitate, ci ele sunt legate prin constanta lui Planck. Aceste mărimi, coordonata și impulsul, au fost denumite mărimi complementare.

Conform principiului complementarității, cunoștințele sunt limitate deoarece aparatele de măsură interacționează cu obiectul de cercetat. În cazul organismelor vii, conform acestui principiu al complementarității biologice Bohr arată că pentru a descrie un organism ar trebui făcute măsurători care ar interfera așa de puternic cu procesele din organism încât ar putea distruge chiar viața (1933).

O opinie similară are și Werner Heisenberg, fondatorul mecanicii cuantice matriciale care arată în 1962 "O descriere a unui organism nu poate fi completă din punct de vedere fizic pentru că ar cere experimente care ar interfera prea puternic cu funcțiile biologice".

Un alt fizician teoretician, Erwin Schrodinger, cel care a pus bazele mecanicii cuantice prin ecuația ce-i poartă numele, a ținut lecții la Dublin despre aspecte fizice ale celulei vii, lecții care au apărut în cartea "What is life ?".

Deci, în același timp, conceptele fizice au pătruns tot mai mult în studiul biologic iar cercetările biologice au pus la punct metode de cercetare care au avut mare succes în cercetările de fizică.

Intrucât este greu de dat o definiție a vieții sau a sistemelor vii precum și a domeniului de studiu al biofizicii vom da în încheiere aprecierea Prof. K.S. Cole, privind biotica. **"Biophysics includes everything that is interesting and excludes everything that is not."**, adică "Biofizica include tot ce este interesant și exclude tot ce nu este așa."

CAPITOLUL I. FLUIDE BIOLOGICE

I.1 Caracteristici generale ale fluidelor

Fluidul reprezintă un mediu continuu, infinit divizibil, care își modifică forma foarte mult sub acțiunea unei forțe mici (gazele și lichidele). Ele au coeziune moleculară mică datorită căruia curg și iau forma vasului.

Dintre fluide, cel mai important este apa, care acoperă 70% din suprafața planetei. Apa se consideră a fi **matricea vieții** datorită faptului că, se pare că viața a apărut în apă, pe de o parte, iar pe de altă parte, apa este indispensabilă vieții.

Astfel apa este solventul universal atât în mediul interstițial în care se află celulele cât și în mediul intracelular în care au loc toate reacțiile chimice. Apa este mediul de transport al substanțelor de la un organ la altul și de eliminare a produsilor de dezasimilație în afara organismului (prin urină și transpirație). În cazul plantelor, apa, alături de dioxidul de carbon, stă la baza procesului de fotosinteză.

Având conductibilitate termică și căldură specifică mare, apa constituie un factor de ameliorare a variațiilor de temperatură a organismelor iar la homeoterme evaporarea apei constituie principala formă sub care se degajă căldura rezultată din catabolism. În afara acestor funcții, apa este un protector mecanic a unor sisteme (sistemul nervos central), este mediul de suspensie al unor celule libere (elementele figurate ale sîngelui). Acesta este motivul pentru care vom începe studiul biofizicii cu studiul fluidelor biologice. Înțelegerea unor procese complexe cum ar fi circulația sangvină, respirația etc., necesită de asemenea cunoașterea legilor fizice ale mișcării fluidelor.

Vom prezenta în continuare câteva fenomene specifice fluidelor, fenomene ce explică funcționarea organismului uman și animal.

Făcăm observația că în cadrul mecanicii fluidelor se studiază proprietățile fluidelor din punct de vedere macroscopic, fără a se lua în considerare mișcările atomilor și moleculelor care intră în compoziția acestora (aceasta atât timp cât dimensiunile fluidului considerat sunt mult mai mari decât drumul liber mediu, care este distanța dintre două ciocniri).

Fluidul se caracterizează prin anumiți parametri ce descriu starea lui în orice moment : densitate ρ , presiune p , viteză v , temperatura T , etc.

Densitatea ρ unui fluid neomogen într-un punct este :

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (I.1)$$

în fiind masa fluidului iar V volumul său iar " d " denotă diferenciala acestor mărimi. Densitatea variază de la punct la punct, precum și de la un moment la altul, deci $\rho = \rho(\vec{r}, t)$

Densitatea variază foarte puțin la lichide și foarte mult la gaze în cazul variației presiunii și temperaturii.

Forțele care acționează asupra unui fluid sunt exterioare și interioare. Cele exterioare se datoresc unor cauze exterioare și pot fi de suprafață când se datoresc unor corpuri ce se află în contact direct cu suprafața fluidului, iar cele de volum sunt acelea care acționează asupra întregului volum de fluid prin intermediul unui câmp fizic (câmp gravitațional sau electromagnetic).

Forțele interioare se datoresc interacțiunilor dintre diferitele elemente de volum ale fluidului și sunt și acestea de suprafață sau de volum.

În legătură cu acțiunea forțelor exterioare de suprafață trebuie precizat că, spre deosebire de solid unde nu există nici o restricție asupra direcției în care acționează forța, în cazul fluidului, forța trebuie să fie normală la suprafață. De aceea în cazul fluidelor acțiunea forțelor exterioare este descrisă prin presiune.

$$p = \frac{dF}{dS} \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (1.2)$$

Dar $p = p(\vec{r}, t)$ deci p descrie un câmp de presiuni.

Dacă se consideră un fluid în mișcare, se introduce câmpul de viteze corespunzător

$$\vec{v} = \vec{v}(\vec{r}, t)$$

Dacă un fluid nu-și modifică densitatea când este supus acțiunii unor forțe, el se numește incompresibil. Se consideră, de obicei, că lichidele sunt incompresibile iar gazele, compresibile. Se poate considera că și gazele sunt incompresibile dacă viteza lor de mișcare este mică în comparație cu viteza sunetului.

Pentru caracterizarea fluidelor din acest punct de vedere se introduce numărul lui Mach

$$M = v/v_s$$

unde v = viteza de deplasare a fluidului

v_s = viteza sunetului

Pentru $M < 0,3$ fluidul este **incompresibil** (în cazul aerului $M=0,3$ pentru $v=100$ m/s)

Problema fundamentală a mecanicii fluidelor o constituie determinarea câmpurilor de presiune și viteză în interiorul unui fluid aflat în condiții fizice bine determinate.

O proprietate importantă a fluidelor este vâscozitatea ce reprezintă proprietatea fluidului de a se opune la alunecarea unui strat de fluid față de straturile vecine. Ea se datorește forțelor de frecare internă, forțe tangențiale ce apar între straturile vecine. Un fluid ce prezintă vâscozitate, este fluid vâscos.

(Gazele reale și lichidele sunt fluide vâscoase). Fluidele ce nu prezintă proprietatea de vâscozitate sunt ideale. Ele nu există în realitate dar ele reprezintă o primă aproximație a celor reale.

Statica fluidelor studiază proprietățile fluidelor aflate în stare de echilibru (repaos), adică atunci când orice element de volum din compoziția sa are viteza nulă. În acest caz $\vec{p} = p(\vec{r})$. Dacă fluidul este ideal și în repaos, între diferitele straturi nu pot apărea forțe tangențiale pentru că ele ar determina (oricât de mici ar fi) deplasări ale stratului de fluid. Deci, în cazul fluidelor ideale, aflate în repaos singurele forțe sunt cele normale.

1.2. Legea fundamentală a staticii fluidelor

Considerăm un element de volum de masă dm , de forma unui paralelipiped. Considerăm că singurele forțe care acționează sunt cele de presiune (de suprafață) și cele gravitaționale (de volum)(Fig.1.1).

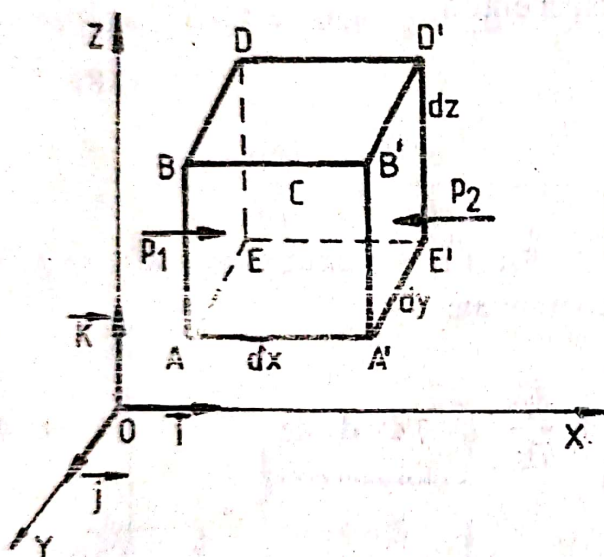


Fig.1.1

$$d\vec{F} = \rho \vec{g} dm = \rho \vec{g} dx dy dz \quad (1.3)$$

Pentru a evalua forțele de suprafață considerăm că în punctul C acționează presiunea $p(x,y,z)$. Atunci presiunea într-un punct al suprafeței ABDE, $\perp$ pe Ox este

$$p_1 = p(x - dx/2, y, z) \quad (1.4)$$

Dezvoltând în serie Taylor expresia de mai sus, se obține:

$$p_1 = p(x,y,z) - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} + \dots \quad (1.5)$$

Forța de suprafață ce se exercită pe suprafața ABDE este atunci :

$$d\vec{F}_1 = p_1 dy dz \vec{i} = (p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} + \dots) dy dz \vec{i} \quad (1.6)$$

iar pe suprafața opusă A'B'D'E

$$d\vec{F}_2 = (p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} + \dots) dy dz \vec{i}$$

Forța rezultantă se obține făcând diferența celor două componente :

$$d\vec{F}_x = - \frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz \vec{i} \quad (1.7)$$

În mod analog se obțin și celelalte componente :

$$d\vec{F}_y = - \frac{\partial p}{\partial y} dx dy dz \vec{j} \quad (1.8)$$

$$d\vec{F}_z = - \frac{\partial p}{\partial z} dx dy dz \vec{k}$$

Aici $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ sunt versorii axelor de coordonate.

Forța de suprafață rezultantă este deci :

$$d\vec{F}_s = - (\frac{\partial p}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \vec{k}) dx dy dz \quad (1.9)$$

adică :

$$d\vec{F}_s = - \nabla p dx dy dz \quad (1.10)$$

unde cu ∇ am notat operatorul de derivare parțială.

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad (1.11)$$

Condiția de echilibru a elementului de volum este ca rezultanta forțelor să fie nulă, adică

$$d\vec{F}_v + d\vec{F}_s = 0$$

sau

$$\rho g dx dy dz + \nabla p dx dy dz = 0 \quad (1.12)$$

adică $\rho \vec{g} = \nabla p$

deci :

$$\vec{g} = \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (1.13)$$

care este legea fundamentală a staticii fluidelor.

Dacă în afară de câmpul gravitațional mai acționează și alte forțe, atunci legea fundamentală a staticii se scrie

$$\vec{f} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (I.14)$$

unde f este valoarea rezultantei forțelor exterioare de volum raportată la unitatea de masă.

Ecuatia (I.14) este o ecuație diferențială cu derivate parțiale de ordinul I, din care prin integrare se obține p dacă se dau condițiile la frontieră și se cunoaște dependența lui f de p și de poziție.

I.3. Aplicații ale legii fundamentale a staticii lichidelor

I.3.1. Presiunea hidrostatică.

Pentru a obține presiunea hidrostatică se calculează distribuția presiunii într-un fluid incompresibil ($\rho = \text{const.}$), de exemplu un lichid aflat în câmp gravitațional. Dacă se alege g după axa oz , atunci $g(0,0,-g)$ și legea (I.13) se scrie :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (I.15)$$

Integrând între două puncte A și B (Fig.I.2) ultima relație din (I.15), rezultă :

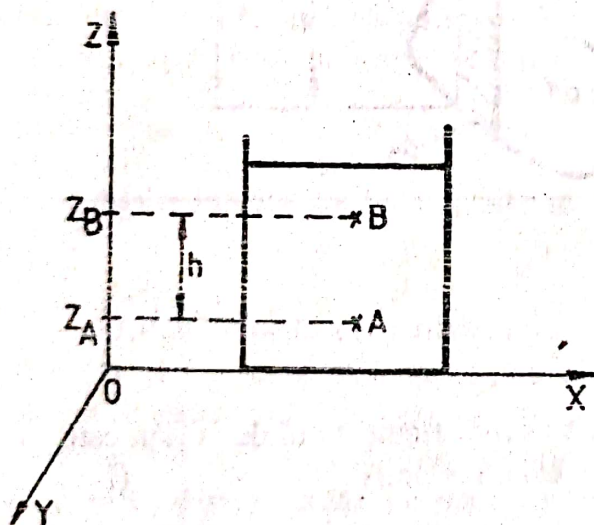


Fig.I.2

$$\int_A^B dp = \int_{z_A}^{z_B} \rho g dz$$

adică :

$$p_B - p_A = -\rho g (z_B - z_A) \quad (I.16)$$

Dar $z_B - z_A = h$ și atunci (I.16) devine

$$p_h = p_a + \rho gh \quad (I.17)$$

Dacă fluidul considerat este lichid presiunea ρgh obținută se numește presiune hidrostatică și renunțând la indici, se obține :

$$p = p_0 + \rho gh \quad (I.18)$$

Factorul hidrostatic din expresia presiunii hidrostatice este aplicabil sistemului vascular

Când corpul este în poziție orizontală, presiunile arteriale medii din creier și din picioare sunt aproximativ egale ; în caz de ortostatism presiunea hidrostatică micșorează presiunea arterială din creier și o mărește pe cea din picioare(sub nivelul inimii)

I.3.2. Legea lui Arhimede .

Dacă se consideră un corp de volum V introdus într-un lichid de densitate ρ , aflat în repaos și se alege un element de volum dV , de formă cilindrică cu aria bazei dS , presiunile ce se exercită pe cele două fețe ale elementului de volum sunt după (I.18)

$$p_1 = p_0 + \rho gh_1$$

$$p_2 = p_0 + \rho gh_2$$

(conform Fig. I.3)

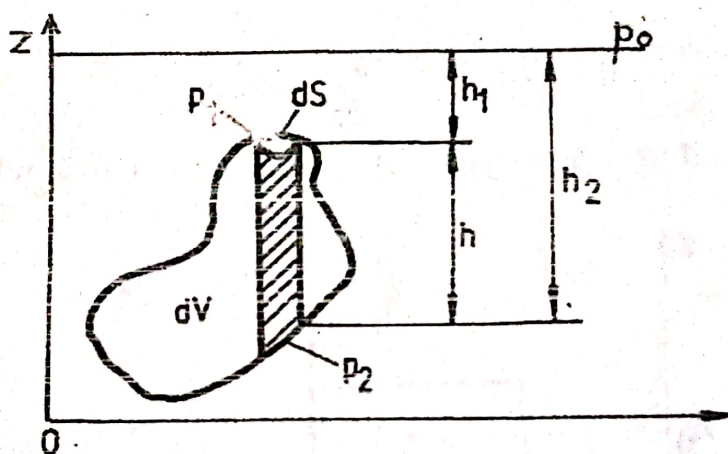


Fig.I.3

Forța care acționează pe verticală asupra elementului de volum este

$$dF_z = (p_2 - p_1) dS = \rho g (h_2 - h_1) dS = \rho g dV \quad (I.19)$$

Integrând pe tot volumul se obține :

$$F_z = \rho g V \quad (I.20)$$

Expresia (I.20) este formula forței Arhimedice.

Principiul(legea) lui Arhimede se enunță astfel : *Asupra unui corp cufundat într-un lichid acționează de jos în sus o forță egală cu greutatea lichidului deplasat de acel corp.*

1.4. Dinamica fluidelor

Dacă viteza $\vec{v}$ a fluidului în fiecare punct este constantă curgerea este staționară iar când vitezele variază neregulat de la punct la punct, curgerea este turbulentă.

Problema fundamentală a dinamicii o reprezintă determinarea câmpului de presiune și a câmpului de viteze ale unui fluid aflat în mișcare.

Studiul unui fluid în mișcare compor tă următoarele caracteristici :

1) linia de curent care este traiectoria unui element de fluid pentru care viteza este tangentă la linie (în cazul curgerii staționare liniile de curent nu se pot intersecta).

2) tub de curent care reprezintă totalitatea liniilor de curent ce trec printr-o suprafață închisă (în curgerea staționară liniile de curent din interiorul tubului nu-l pot părăsi)

3) mișcarea unui fluid înseamnă a determina modul de deplasare a particulei de fluid .

4) suprafața de curent este suprafața construită de liniile de curent ce se sprijină pe o curbă oarecare.

Tubul de curent este suprafața de curent ce se sprijină pe o curbă închisă.

Liniile de curent au următoarele proprietăți :

1) nu se intersectează

2) umplu tot spațiul în care este lichidul

Din punct de vedere a structurii fizice a mișcării există : **curgere laminară**, când straturile de fluid nu se amestecă și **curgere turbulentă**, atunci când straturile se amestecă între ele, prezintă vârtejuri.

Se definește vectorul vârtej (vortex , vorticity)

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{v}$$

Se numește linie de vârtej – linia ce admite ca tangentă în fiecare punct vectorul vârtej.

1.4.1 Ecuația de continuitate

Una din legile cele mai importante ale dinamicii fluidelor este ecuația de continuitate ce reprezintă legea conservării materiei.

Prin definiție fluxul vitezei printr-o suprafață reprezintă numărul de linii de curent ce trec perpendicular pe acea suprafață. Dacă se consideră o curgere uniformă

$$\Phi = \vec{v} \cdot \vec{S} \quad (1.21)$$

sau $\Phi = \vec{v} \cdot \vec{S} \cos \alpha$, α fiind unghiul dintre direcția vitezei și normala la suprafața considerată iar S este suprafața străbătută de liniile de câmp.

În general dacă v nu este constant fluxul se definește astfel :

$$\Phi = \int \vec{v} \cdot d\vec{S} = \int v_n dS \quad (1.22)$$

v_n fiind proiecția vitezei pe normala la suprafață

Considerăm un tub de curent, în care separăm 2 secțiuni transversale. Volumul de fluid va fi $V = v S \Delta t$ (t fiind timpul). Într-o secundă volumul de fluid va fi debitul volumic :

$$Q_v = v s = V / \Delta t \quad (1.23)$$

$$\text{sau } Q_m = \rho v s \quad (1.24)$$

Deci debitul volumic este egal tocmai cu fluxul vitezei.

Pentru a stabili ecuația de continuitate considerăm în fluid un volum V , a cărui masă este

$$m = \int \rho dV \quad (1.25)$$

Dacă prin suprafața dS iese în timpul dt masa dm , variația masei din volumul V va fi

$$\frac{\partial m}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV = - \int \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (1.26)$$

Dar această cantitate de fluid va fi cuprinsă într-un volum elementar de arie dS și înălțime egală cu v , adică va fi tocmai $\rho v dS$, deci

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \oint \rho v dS$$

$$\text{sau } - \int \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \oint \rho v dS \quad (1.27)$$

Ecuația (1.27) este ecuația de continuitate sub formă globală.

Dar aplicînd relația de trecere de la integrala dublă la cea triplă (formula Stokes)

$$\oint (\rho v) dS = \iiint \operatorname{div} (\rho v)$$

se obține :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1.28)$$

Ecuația (1.28) este ecuația de continuitate sub formă locală.

Dacă fluidul este incompresibil ($\rho = \text{const.}$), deci $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ atunci și

$$\nabla v = 0 \Rightarrow \operatorname{div} v = 0 \quad (1.29)$$

Vectorul $j = \rho v$ este vectorul densității fluxului de masă

1.4.2. Ecuația lui Euler

Ecuația lui Euler este ecuația de mișcare a fluidului ideal ce rezolvă problema câmpului de viteze și presiune și are forma :

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{1}{\rho} \nabla p + f \quad (1.30)$$

Deducerea ecuației lui Euler este data în anexa 1.

În prezența gravitației obținem :

$$\vec{a} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} \quad (I.31)$$

Ecuația lui Euler împreună cu ecuația de continuitate și condițiile inițiale permit determinarea vitezelor și presiunilor , dacă lichidul este incompresibil și se cunoaște f .

Dacă fluidul este compresibil, este necesară o relație termodinamică pentru densitate, de exemplu $\rho = \rho(p)$ ca în cazul fluidelor barotrope. Pentru cunoașterea caracteristicilor fluidului sunt necunoscute 3 viteze (v_x, v_y, v_z), presiunea p și densitatea ρ , deci sunt necesare 3 ecuații Euler, ecuația de continuitate și ecuația de stare.

Deci sistemul complet de ecuații a fluidului ideal conține 5 ecuații :

- 3 ecuații Euler : $\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + f$
- 1 ecuație de continuitate : $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0$
- 1 ecuație de stare de stare : $p = p(\rho)$ sau $\rho = \rho(p)$ pentru fluidul barotrop.

1.4.3 Aplicații ale legii lui Euler

a) Legea lui Pascal

Considerăm un fluid în repaos ($v = 0$) , în absența forțelor masice exterioare ($f=0$) : din legea Euler(I.30) rezultă :

$$-\frac{1}{\rho} \nabla p = 0 \text{ deci } \nabla p = 0$$

adică

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad (I.32)$$

Relațiile (I.32) reprezintă legea lui Pascal, care se enunță astfel : într-un fluid izolat , presiunea este aceeași în toată masa fluidului.

b) Legea lui Bernoulli

Integrarea ecuațiilor de mișcare a lui Euler este dificilă și ea se realizează doar în cazuri concrete. Un astfel de caz este cel care conduce la obținerea legii lui Bernoulli.

Legea lui Bernoulli se referă la curgerea unui fluid nevâscos , printr-un tub de curent , atunci când singura forță volumică este cea datorată câmpului gravitațional.

Fie un tub de curent ca în Fig. I.4

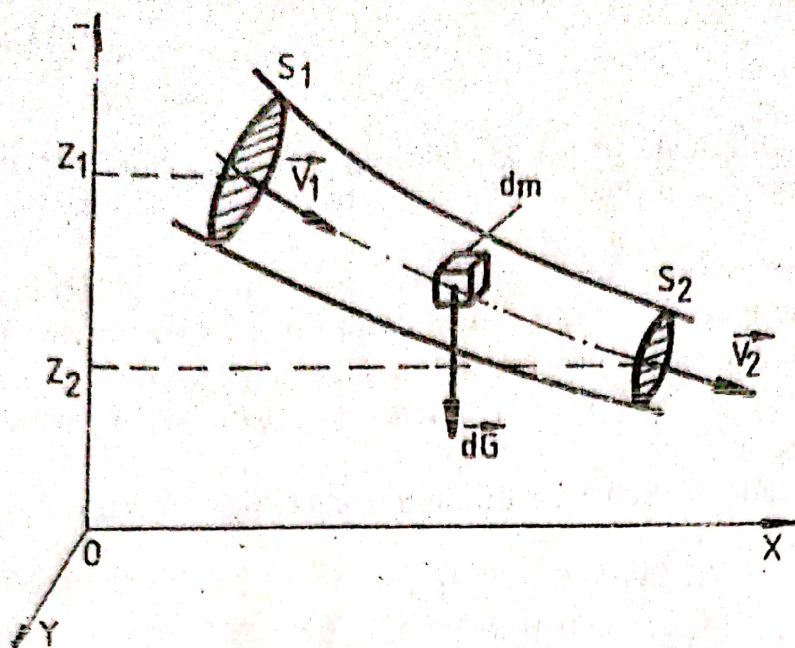


Fig. I.4

Ecuatia lui Euler proiectată pe axe devine :

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \frac{dv_y}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad \frac{dv_z}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (I.33)$$

Înmulțind prima ecuație cu dx , a II-a cu dy și a III-a cu dz și apoi adunând relațiile, se obține :

$$\frac{dv_x}{dt} dx + \frac{dv_y}{dt} dy + \frac{dv_z}{dt} dz = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) - g dz$$

sau

$$v_x dv_x + v_y dv_y + v_z dv_z = -\frac{1}{\rho} dp - g dz \quad (I.34)$$

adică $d\left(\frac{v^2}{2}\right) = -\frac{1}{\rho} dp - g dz$

ce dă prin integrare :

$$\rho \frac{v^2}{2} + p + \rho g z = \text{constant} \quad (I.35)$$

Ecuatia (I.35) reprezintă legea lui Bernoulli.

Termenul $\rho v^2 / 2$ este presiunea dinamică, $\rho g z$ este presiunea de poziție iar p este presiunea statică. Enunțul acestei legi este : *de-a lungul unei linii de curent suma între presiunea dinamică, statică și de poziție este constantă într-o curgere staționară a unui fluid ideal, incompresibil.*

Cei trei termeni reprezintă o densitate de energie deci legea lui Bernoulli reprezintă de fapt legea conservării energiei fluidului de-a lungul liniei de curent.

Legea lui Bernoulli stabilește că vitezele maxime ale lichidelor sunt asociate unor presiuni laterale minime asupra pereților. *Energia cinetică a fluxului sanguin este importantă când debitul și traverșiul cardiac cresc datorită efortului. De asemenea ea este extrem de importantă când se produce îngustarea locală a arterelor (ateroscleroza) deoarece ea tinde să determine persistența îngustării acestora prin scăderea presiunii laterale.*

c) Tubul Venturi

Tubul Venturi se folosește la determinarea debitului volumic. Este compus dintr-un tub de secțiuni diferite, S_1 și S_2 care sunt conectate la un manometru cu lichid (fig. I.5)

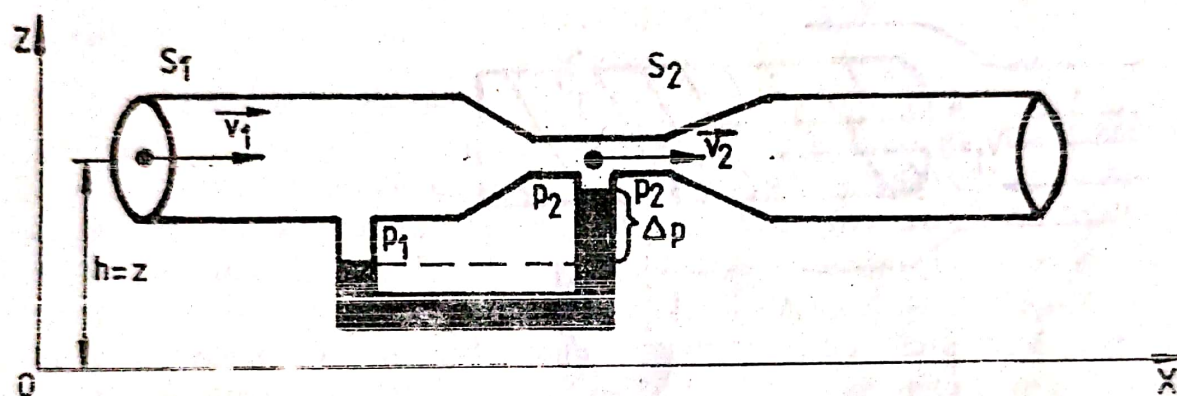


Fig. I.5

Aplicând legea lui Bernoulli dată de (I.35), pentru cele două secțiuni, avem :

$$\rho \frac{v_1^2}{2} + p_1 + \rho gh = \rho \frac{v_2^2}{2} + p_2 + \rho gh$$

sau

$$\frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) = p_1 - p_2$$

Dacă fluidul este incompresibil $S_1 v_1 = S_2 v_2$ și atunci

$$\frac{1}{2} \rho v_2^2 \left[1 - \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right] = p_1 - p_2$$

Pentru viteza fluidului se găsește :

$$v_2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right]} \quad (1.36)$$

iar debitul volumic va fi :

$$Q = S_2 v_2 = K \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (I.37)$$

Cunoscând constanta K a tubului Venturi, densitatea ρ a fluidului, se măsoară debitul volumic Q măsurând diferență de presiune statică la manometru. Dacă se etalonează manometrul, denivelarea lichidului dă direct debitul volumic.

d) Sonda Pitot

Sonda Pitot servește la măsurarea presiunii totale dintr-o conductă orizontală (suma dintre presiunea dinamică și statică). Este formată dintr-un manometru M fixat pe un suport convenabil ales (T) (Fig. I.6)

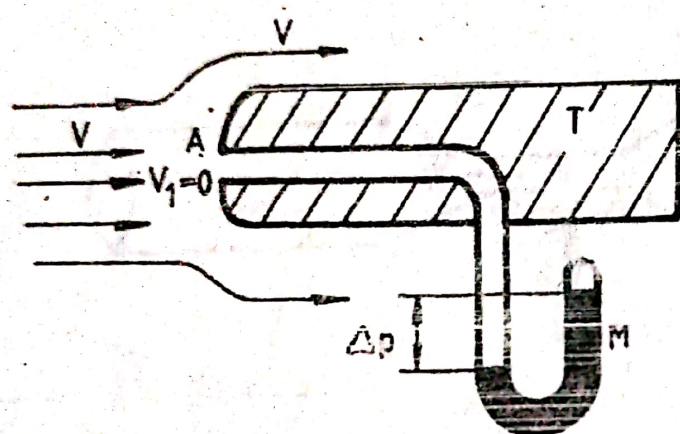


Fig. I.6

În punctul A , $v_A = 0$ și atunci legea lui Bernoulli devine :

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p = p_A$$

Presiunea totală este egală cu presiunea statică în punctul de intrare al sondei (punctul A), presiune ce este dată de denivelarea mercurului.

e) Sonda Prandtl

Sonda Prandtl (Fig. I.7) permite măsurarea vitezei de curgere a unui fluid. Legea lui Bernoulli se scrie :

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p_B = p_A$$

și pentru viteza de curgere a fluidului se obține :

$$v = \sqrt{\frac{2(p_A - p_B)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1.38)$$

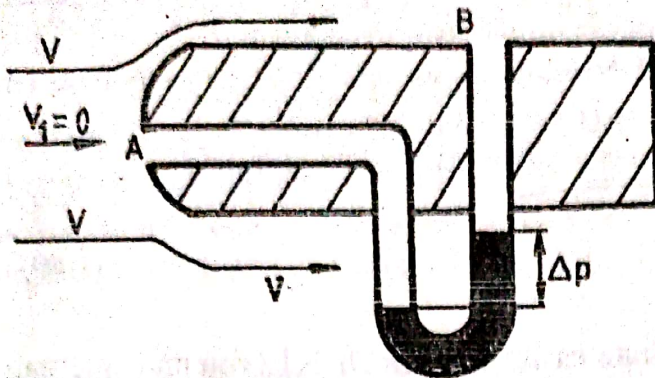


Fig.1.7

I.5. Fluide viscoase

Pentru a descrie mișcarea fluidelor reale trebuie să se țină cont de interacțiunile dintre diferitele elemente de fluid sau dintre fluid și pereții tuburilor prin care curge acesta. Aceste forțe se manifestă prin apariția unor forțe de frecare internă dintre straturile de fluid sau între fluid și pereții vecini. Fluidele la care se manifestă astfel de forțe de frecare se numesc fluide viscoase iar fenomenul se numește viscozitate. Să considerăm un fluid viscos plasat între două suprafețe plane A și B dispuse paralel, suprafața A fiind fixă iar suprafața B se află într-o mișcare de translație cu viteza v . (Fig. I.8). Diferitele straturi de fluid dintre cele două suprafețe se pun în mișcare datorită forțelor de frecare. Cu viteze cuprinse între 0 și v . Deci între diferitele straturi apare o variație de viteză, (gradient de viteză) în direcție perpendiculară pe direcția de mișcare. Dacă se notează cu S aria comună a celor două suprafețe, forța de frecare internă este :

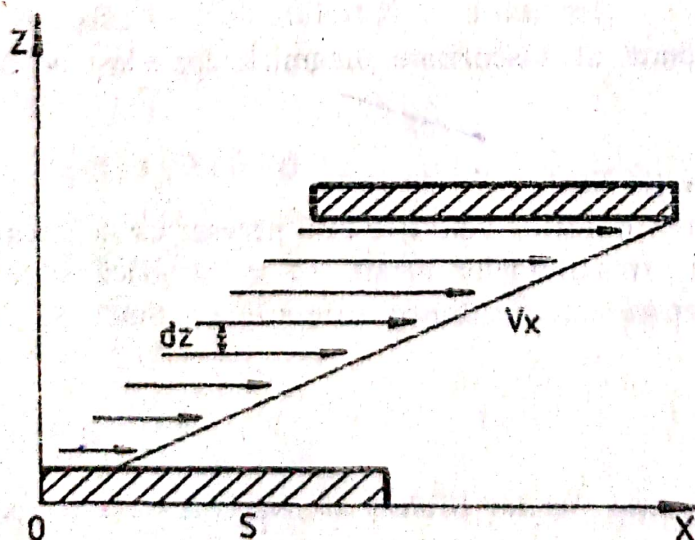


Fig.1.8

$$F = -\eta \frac{dv}{dz} S \quad (I.39)$$

semnul "-" arătând că forța de frecare este de sens opus mișcării fluidului

Expresia (I.39) reprezintă forma analitică a legii lui Newton

Factorul de proporționalitate η este coeficientul de viscozitate dinamică.

Unitatea de măsură în sistemul internațional este decapoisul (daP) = 1 Kg/m.s

Lichidele care respectă legea lui Newton se numesc lichide newtoniene iar cele care nu respectă această lege, lichide nenewtoniene.

În practică se folosește și viscozitatea cinematică, dată de relația :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (I.40)$$

ρ fiind densitatea fluidului. Unitatea de măsură în S.I (sistemul internațional) pentru viscozitatea cinematică este decakilostokesul (dakSt) definită prin relația :

$$\nu = \frac{m^2}{s} = 1 \text{ dakSt}$$

Se definește și viscozitatea relativă

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_s} \quad (I.41)$$

η_s fiind viscozitatea dinamică a unui fluid de referință.

Mărimea

$$\varphi = \frac{1}{\eta}$$

(I.42)

se numește fluiditate.

Facem observația că viscozitatea dinamică este funcție de temperatură. De exemplu pentru apă aceasta scade după o lege de forma :

$$\eta = Ae^{\frac{b}{T}}$$

Pentru toate fluidele coeficientul de viscozitate dinamică depinde și de natura fluidului respectiv

1.6. Ecuațiile Navier-Stokes

Pentru a descrie mișcarea fluidelor vâskoase este necesar ca în ecuația lui Euler (I.30), care descrie mișcarea fluidelor ideale, să se introducă un termen corespunzător forțelor de frecare interne dintre straturile de fluid. Se obține atunci ecuația :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}_r + \nu \Delta \vec{v} \quad (I.44)$$

Ecuația (I.44) este ecuația Navier-Stokes și deducerea acestei ecuații este dată în anexa 2.

Această ecuație, împreună cu ecuația de continuitate, permite să se determine câmpul de viteze $v(\vec{r}, t)$ și câmpul de presiuni $p(\vec{r}, t)$ dacă se dau condițiile la limită.

În cazul fluidelor vâscoase, stratul de fluid vecin peretelui vasului în care se află, este în repaus în raport cu acesta. De aceea o condiție la limită trebuie să fie ca viteza fluidului pe pereți să fie nulă ($v = 0$).

1.7. Legea Hagen- Poiseuille

Problema Hagen- Poiseuille este problema curgerii laminare a unui fluid vâscos printr-un tub cilindric, fluidul fiind incompresibil ($\rho = \text{constant}$) și curgerea staționară (viteza diferitelor straturi de fluid nu depinde de timp ci numai de distanța față de axa tubului (Fig. I.9))

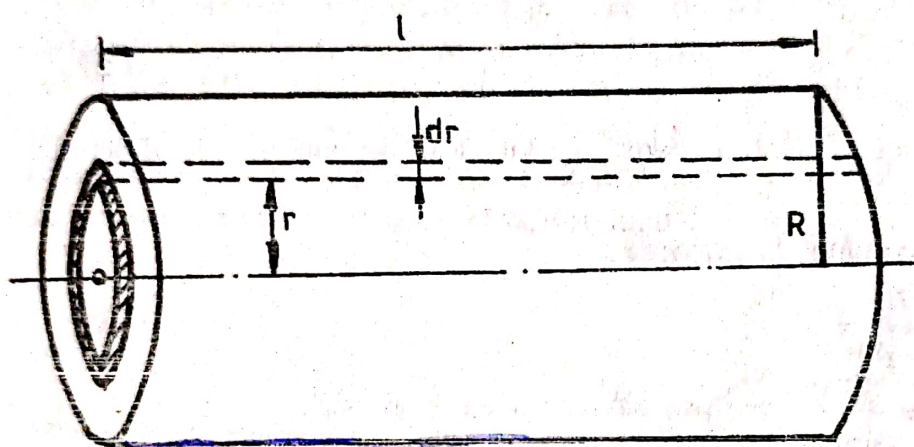


Fig. I.9

Pentru regim staționar, adică $\frac{dv}{dt} = 0$ și considerând că asupra fluidului nu acționează forțe exterioare ($f=0$), legea Navier – Stokes (I.44) devine :

$$\nabla p - \eta \Delta v = 0 \quad (I.45)$$

Dar după figura (I.9) gradientul presiunii este :

$$\nabla p = \frac{p_2 - p_1}{l} \quad (I.46)$$

l fiind lungimea tubului iar $p_2 - p_1$ este diferența de presiune ce acționează asupra lichidului și produce curgerea.

Pentru conducta din Fig.9 , laplace-anul este :

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) \quad (I.47)$$

Din (I.45), (I.46) și (I.47) obținem :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) = \frac{p_2 - p_1}{\eta l} r \quad (I.48)$$

Tinând cont că viteza depinde doar de coordonata r , prin integrarea relației (1.48) se obține :

$$r \frac{dv}{dr} = \frac{p_2 - p_1}{4\eta l} \frac{r^2}{2} + C_1 \quad (1.49)$$

Constanta C_1 se determină din faptul că viteza este maximă (deci $\frac{dv}{dr} = 0$), pe axa conductei, adică pentru $r=0$. Impunând această condiție se găsește $C_1 = 0$. Atunci (1.49) devine :

$$\frac{dv}{dr} = \frac{p_2 - p_1}{4\eta l} \frac{r}{2} \quad (1.50)$$

Integrând acum (1.50) se obține :

$$v = \frac{p_2 - p_1}{8\eta l} \frac{r^2}{2} + C_2 \quad (1.51)$$

Constanta C_2 se determină din condiția ca viteza să fie nulă la nivelul pereților, adică $v(R) = 0$

Această condiție conduce la valoarea :

$$-\frac{p_2 - p_1}{8\eta l} \frac{R^2}{2} = C_2 \quad (1.52)$$

Înlocuind (1.52) în (1.51) se obține pentru viteză, expresia :

$$v = -\frac{p_2 - p_1}{4\eta l} \left(\frac{R^2}{2} - r^2 \right) \quad (1.53)$$

* Pentru a calcula debitul volumic de fluid prin conductă, se consideră un strat de fluid cuprins între r și $r + dr$. Debitul volumic elementar din acest strat este, după definiție :

$$dQ = \frac{dV}{dt} = \frac{ldS}{dt} = v dS \quad (1.54)$$

Dar dS pentru fluidul din domeniul considerat este :

$$dS = 2\pi r dr$$

Debitul total de fluid prin întreaga secțiune a cilindrului se obține prin integrarea expresiei (1.54) :

$$Q = \int_0^R \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (R^2 - r^2) 2\pi r dr$$

din care se obține pentru debitul volumic expresia :

$$* \quad \boxed{Q = \frac{\pi}{8\eta} \frac{p_1 - p_2}{l} R^4} \quad (1.55)$$

care este legea Hagen-Poiseuille.

Legea Hagen-Poiseuille afirmă că debitul de fluid real ce curge printr-o conductă cilindrică este proporțional cu puterea a patra a razei acesteia și cu gradientul de presiune $\frac{P_1 - P_2}{l}$.

Proportionalitatea cu puterea a patra de raza capilarului a debitului sângelui are consecințe fiziologice în cazul circulației sangvine. Distribuția sângelui în diferitele părți ale corpului este reglată cu ajutorul musculaturii netede din pereții arteriali. Prin contracția acestor mușchi, declanșată pe cale neurohormonală, vasul se micșorează, ceea ce determină o reducere puternică a debitului, deci se poate face o reglare eficientă a debitului.

1.8. Legea lui Stokes.

Un alt aspect important legat de fluidele vâscoase o constituie determinarea forței de frecare ce se exercită asupra unui corp aflat în mișcare relativă față de fluid. Cazul cel mai simplu este cazul unui corp sferic aflat într-un fluid care are o curgere laminară în regiunile îndepărtate de sferă. Distribuția vitezelor în funcție de distanța de la centrul sferei este dată în Fig. I.10, atât pentru un fluid ideal ($\eta = 0$) cât și pentru unul vâscos.

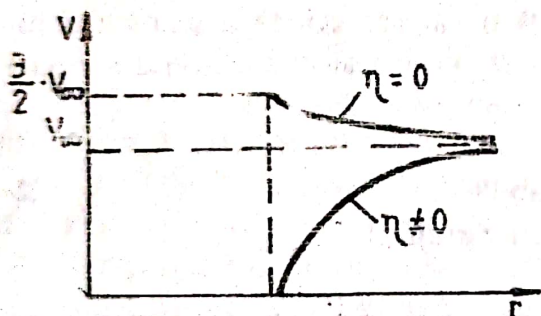


Fig. I.10

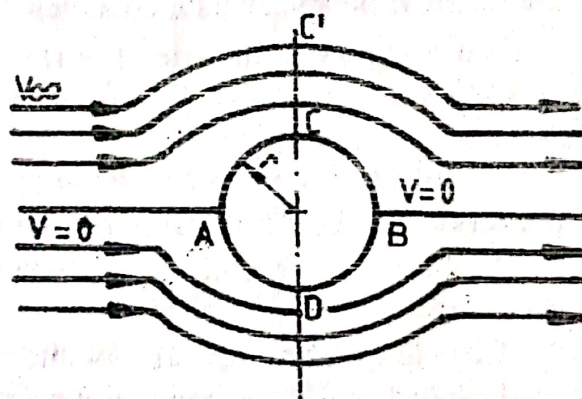


Fig. I.11

Din Fig. I.10 și I.11 se observă că, pentru un fluid ideal, viteza este maximă în punctul C și este egală cu $3/2 v_\infty$, (v_∞ fiind viteza fluidului departe de sferă) iar pentru unul vâscos viteza este maximă în punctul C', care este departe de sferă și este egală cu v_∞ . Deci fluidele vâscoase aderă la sferă și ca urmare gradientul de viteză este maxim la suprafața sferei unde apar forțele de vâscozitate dintre fluid și sferă.

Măsurătorile experimentale și studiile teoretice au condus la următoarea expresie a forței de vâscozitate:

$$F = 6\pi\eta r v \quad (I.56)$$

Formula I.56 este cunoscută sub denumirea de legea lui Stokes. Ea arată faptul că la deplasarea unei sfere printr-un fluid vâscos, forța de frecare ce se exercită

asupra sferei este proporțională cu coeficientul de vâscozitate dinamică, cu raza sferei și cu viteza cu care sfera se deplasează prin fluid.
Pe baza legii lui Stokes se poate determina vâscozitatea dinamică a unui lichid vâscos.

1.8.1. Curgere laminară și turbulentă.

La viteze mici de curgere, straturile de lichid se deplasează paralel unele față de altele, deci lichidul are o curgere laminară.

Curgerea laminară se întâlnește în cazul tuburilor având raza mică, așa cum sunt de exemplu vasele capilare.

Dacă viteza de curgere a lichidului vâscos depășește o anumită valoare, numită valoare critică, (sau secțiunea tubului se mărește), curgerea laminară devine instabilă, transformându-se în curgere turbulentă, când apar vârtejuri în fluid.

Pentru caracterizarea regimurilor de curgere laminară și turbulentă, se introduce numărul lui Reynolds care este dat prin definiție de raportul,

$$Re = \frac{\rho v r}{\eta} \quad (I.57)$$

unde r este raza tubului, v este viteza de curgere, ρ este densitatea fluidului și η coeficientul de vâscozitate dinamică.

Pentru sângele din arterele mari există o valoare critică a numărului lui Reynolds ($Re_{critic} = 1000$) în raport cu care se poate stabili caracterul curgerii astfel:

$Re < 1000$ – curgerea este laminară

$1000 < Re < 2000$ – curgerea este nestabilă

$Re > 2000$ – curgerea este turbulentă (cu vârtejuri)

Turbulența poate apărea și în alte vase de sânge în cazuri patologice, când vâscozitatea este mică (anemie, scăderea CO_2 din sânge).

Deci pentru a avea curgere laminară, după (I.57) și (I.58) trebuie îndeplinită condiția:

$$\frac{\rho v r}{\eta} < 1000 \quad (I.58)$$

Dar debitul volumic de sânge dintr-un vas de sânge este

$$Q = Sv = \pi r^2 v$$

și atunci, pentru raza aortei rezultă condiția:

$$r > \frac{1}{1000} \frac{\rho Q}{\pi \eta} \quad (I.59)$$

Dacă se alege densitatea sângelui $\rho = 1,1 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$, iar $\eta = 0,3 \text{ daP}$, inegalitatea (I.59) conduce la condiția

$$r > 0,013 Q$$

dacă raza se exprimă în centimetri iar debitul volumic în cm^3/s .

Prezentăm în Fig.1.12 modul cum este îndeplinită această condiție pentru om și pentru câteva specii de mamifere.

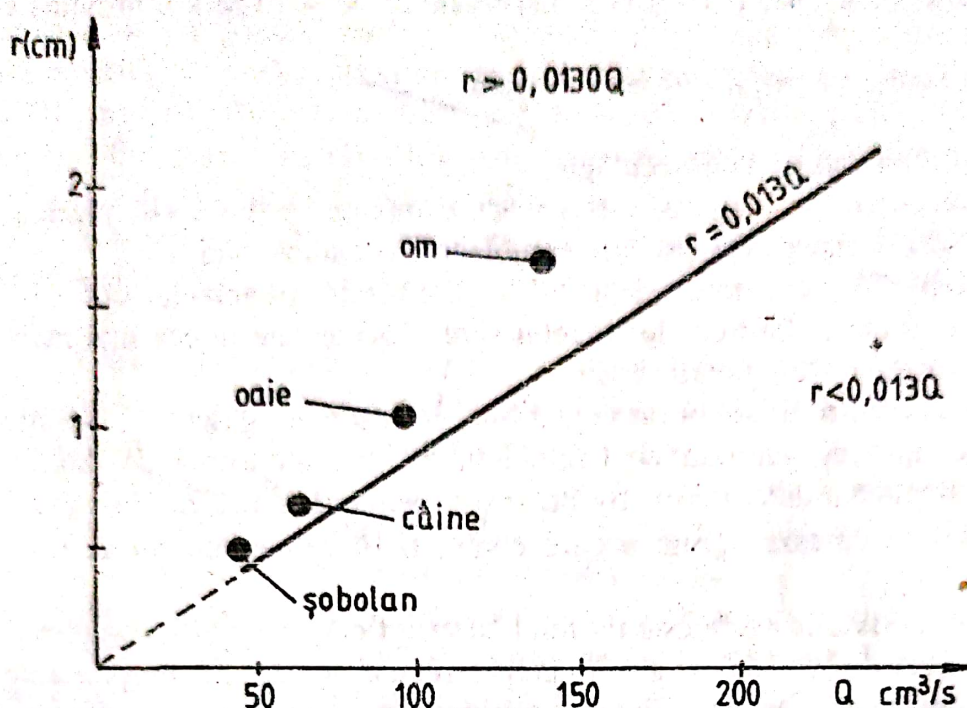


Fig.1.12

Din figura se observă că toate valorile razelor vaselor sanguine se află în regiunea care satisface condiția pentru curgerea laminară.

✱ În cazul organismului uman, posibilitatea apariției turbulenței este acolo unde viteza sângelui are valoarea cea mai mare, adică în aortă.

Cum debitul de sânge la nivelul aortei este $Q = 100 \text{ cm}^3/\text{s}$, deci $r > 1.3 \text{ cm}$, fapt care se confirmă experimental (valoarea experimentală este $r = 1.5 \text{ cm}$.) Aceste aspecte se confirmă și pentru celelalte cazuri ceea ce arată că, în mod obișnuit, curgerea nu este turbulentă.

Sângele are deci o curgere laminară, cu excepția unor zone din vecinătatea valvulelor cardiace unde închiderea și deschiderea lor produce viteze de curgere ridicate, fapt care conduce la apariția zgomotelor cardiace.

I.9. Vâscozitatea lichidelor nenewtoniene

Lichidele care nu respectă legea lui Newton(1.39) se numesc lichide nenewtoniene.

Lichide nenewtoniene sunt soluțiile coloidale și macromoleculare. Pentru aceste soluții coeficientul de vâscozitate dinamică nu mai este o mărime constantă, ca în legea lui Newton, ci depinde de concentrația particulelor dispersate, conform legii lui Einstein:

$$\eta = \eta_0 (1 + KV) \quad (I.60)$$

unde η_0 este coeficientul de vâscozitate al mediului de dispersie, V volumul fazei dispersate din unitatea de volum a suspensiei iar K este o constantă care depinde de natura și mărimea particulelor dispersate ($K = 4-10$ pentru proteinele globulare).

Sângele este de asemenea, un lichid nenenewtonian.

1.10. Noțiuni de hemoreologie

Sângele reprezintă o suspensie de particule într-un mediu apos, plasma. Plasma conține săruri anorganice precum și molecule organice mici.

Aproximativ 7% din masa singelui o constituie proteinele din care jumătate sunt albuminele. Particulele singelui sunt reprezentate în cea mai mare parte, aproximativ 97%, din globule roșii.

Eritrocitele conțin o membrană flexibilă în care se găsește o soluție apoasă (o soluție aproape saturată de hemoglobină). Ele au forma de discoide biconcave cu un diametru de aproximativ 8μ și o grosime de circa 2μ . În singele normal eritrocitele formează agregate care conțin 6-10 celule sub forma unor rulouri.

Din aceste motive, sângele este un fluid cu proprietăți reologice complexe. De aceea proprietățile reologice ale singelui trebuie legate de proprietățile constituentilor săi, de agregabilitatea eritrocitară, vâscozitatea plasmăi, proprietățile vâscoelastice ale membranei eritrocitare etc.

Vâscozitatea sângelui depinde deci de un număr mare de parametri cum ar fi densitatea, temperatura, hematocritul, agregarea și deformarea eritrocitelor, etc. Hematocritul este raportul procentual dintre volumul elementelor figurate (în cea mai mare parte hematii) și volumul total al sângelui.

Hematocritul pentru omul sănătos are valori cuprinse între 45% și 50%.

Coeficientul de vâscozitate al sângelui este o funcție neliniară în hematocrit. Dependența coeficientului de vâscozitate relativă în raport cu apa este dată în Fig. I.13.

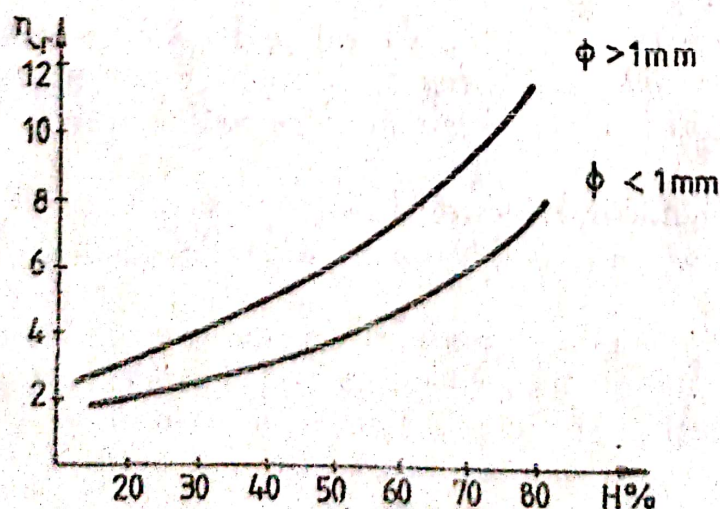


Fig. I.13

Din Fig.I.13 se observă că η_r ia valori între 2 și 12 (în cazul poliglobuliilor). Măsurătorile cu vâscozimetru rotțional au arătat că vâscozitatea depinde de rata de forfecare. Cinetica formării și rupturii agregatelor guvernează reologia sângelui la rate mici de forfecare iar cinetica deformării și orientării acestora, la rate mari de forfecare. Vâscozitatea sângelui scade puternic la viteze mici de forfecare pentru animalele pentru care agregabilitatea este puternică și este aproape constantă pentru cele pentru care agregarea eritrocitară este nesemnificativă.

S-a pus în evidență că agregabilitatea eritrocitară este puternică în cazul animalelor atletice: antilopă, leu cal și este aproape inexistentă la vacă și la oaie.

Cum agregabilitatea sângelui este un fenomen reversibil, dependent de timp, vâscozitatea sângelui trebuie să depindă și de timp; de altfel fenomenul de tixotropie a fost pus în evidență experimental.

În ultimul deceniu s-a propus experimentarea comportării vâscozității sângelui în condiții de inponderabilitate de pe navele cosmice și, deși nu s-a pus în evidență experimental o posibilă creștere a vâscozității sângelui în condițiile anulării gravitației, există modele teoretice care sugerează acest lucru.

Aceste aspecte legate de comportarea nenewtoniană a sângelui face ca vâscozitatea aparentă a sângelui să fie mai puțin folosită în practica clinică.

I.10.1. Fenomenul Fahraeus - Lindqvist

Un alt aspect observat în cazul sângelui este dependența coeficientului de vâscozitate relativă de raza tubului capilar care este de forma :

$$\eta_r = \frac{\eta_\infty}{\left(1 + \frac{d}{R}\right)^2} \quad (I.61)$$

unde η_r este coeficientul de vâscozitate măsurat cu un tub cu raza foarte mare, d este diametrul eritrocitelor iar R este raza capilarului. Dependența coeficientului de vâscozitate de raza capilarului este dată în Fig. I. 14.

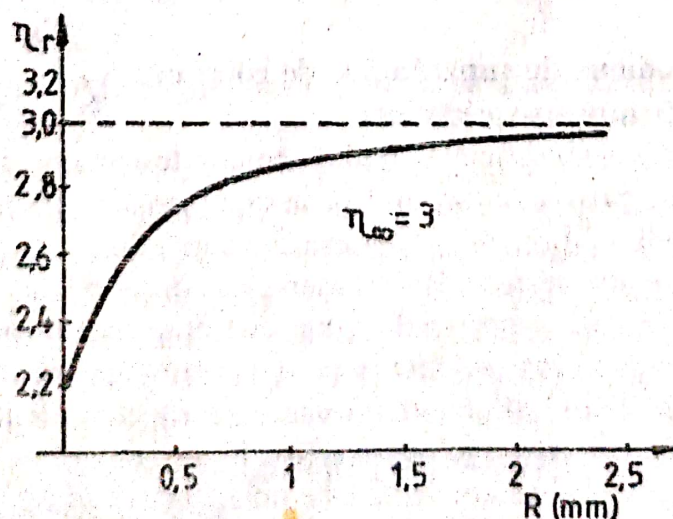


Fig.I.14

Fenomenul de dependență a coeficientului de vâscozitate de raza capilarului este cunoscut sub numele de **fenomenul Fahraeus - Lindqvist**. Acest fenomen are o mare importanță pentru organism deoarece lucrul mecanic pe care trebuie să-l efectueze inima la pomparea sângelui în capilare, care au diametre foarte mici (5μ), este mult mai mic.

Vâscozitatea sângelui depinde și de starea de sănătate a organismului. În cazuri patologice se produc fie modificări ale compoziției plasmei cât și ale hematocritului și astfel se modifică și vâscozitatea sângelui. Astfel coeficientul de vâscozitate relativă al sângelui crește în poliglobulie (ajungând la valoarea 24), în cazuri de hipertensiune sau de asfixie (prin creșterea concentrației de CO_2 din sânge). Creșterea concentrației de CO_2 din sânge determină umflarea celulelor sangvine ceea ce face ca vâscozitatea sângelui (conform formulei lui Einstein), să crească. Deci sângele venos este mai vâscos decât cel arterial. Consumul de alcool, cafea precum și oboseala măresc vâscozitatea sângelui. *Creșterea vâscozității sângelui determină creșterea efortului inimii pentru menținerea unui debit de sânge constant, ceea ce atrage după sine o creștere a presiunii arteriale (tensiunii arteriale). De asemenea, creșterea vâscozității sângelui însoțită de o vasoconstricție capilară, în timpul iernilor geroase, poate provoca stagnarea circulației periferice, care duce la apariția degerăturilor.*

I.11. Concluzii și observații privind curgerea lichidelor în organism

Prin lucrările sale asupra curgerii lichidelor prin tuburi, Poiseuille a pus bazele reologiei, știința care se ocupă cu studiul curgerii fluidelor vâscoase. Aplicarea acestor legi creează complicații pentru că sângele, după cum am aratat, nu este un mediu omogen, având proprietăți anormale de vâscozitate.

De asemenea vasele sanguine nu sunt tuburi rigide, ci extensibile și deci dimensiunile lor depind de presiunea intravasculară și contracția mușchilor netezi din pereții vasului. În plus, în majoritatea porțiunilor, curentul de lichid nu este constant, ci pulsatoriu. Această situație complică fenomenul înțelegerii dinamicii circulației. Totuși aceste legi pot explica destul de bine unele aspecte din comportarea lichidelor biologice.

I.12. Fenomene de suprafață și de contact

I.12.1 Tensiunea superficială

Existența tensiunii superficiale explică multe fenomene din lumea vie. Două picături mai mici, când se ating tind să se contopească. Picătura mai mare va avea o suprafață totală mai mică, deci o energie superficială mai mică. Forma sferică a celulelor libere este, de asemenea, condiționată de tensiunea superficială. Deci fenomenele superficiale arată evoluția unui sistem spre starea de echilibru care este starea caracterizată printr-un minim energetic.

* Sa considerăm un lichid aflat într-un vas. O moleculă aflată în interiorul lichidului este atrasă de celelalte molecule aflate în vecinătate cu forțe egale ca mărime astfel încât rezultanta acestor forțe este nulă (Fig. I.15).

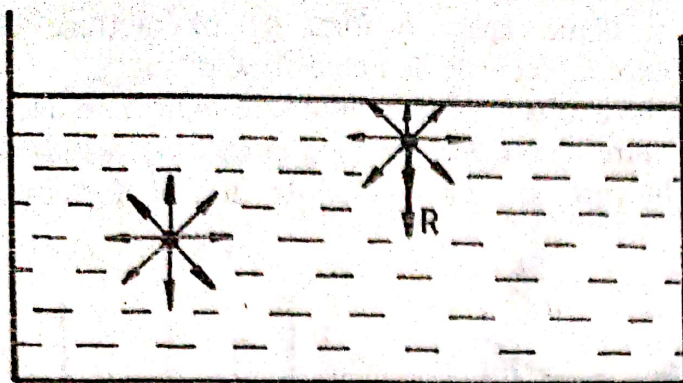


Fig. 1.15

Dacă însă se consideră o moleculă din stratul superficial (stratul de grosime egală cu raza de acțiune moleculară), atunci forțele de atracție care se manifestă din partea gazului sunt mai mici decât cele din partea lichidului și rezultanta acestora va fi nenulă (Fig. 1.15). Corespunzător acestei forțe rezultante, apare o presiune care este exercitată de stratul superficial asupra lichidului, denumită presiune suplimentară. Ca urmare lichidul tinde să reducă dimensiunile stratului superficial, se comportă ca o membrană elastică.

Forțele care apar tangent la conturul suprafeței libere a lichidului tinzând să-i micșoreze această suprafață sunt forțele de tensiune superficială

Deci forța de tensiune superficială poate fi scrisă sub forma :

$$F = \sigma \cdot l \quad \sigma = \frac{F}{l} \quad (1.62)$$

Coefficientul de proporționalitate σ se numește coeficient de tensiune superficială și în SI se măsoară în N/m.

Coefficientul de tensiune superficială poate fi definit și în funcție de energia consumată pentru a menține neschimbată suprafața liberă a lichidului. Lucrul mecanic consumat în acest scop va fi, după definiție :

$$L = F \cdot dl \quad (1.62')$$

Înlocuind (1.62') în (1.62) se obține :

$$L = \sigma \cdot dl = \sigma \cdot dS \quad (1.63)$$

Coefficientul de tensiune superficială reprezintă energia consumată pentru a mări cu o unitate suprafața liberă a lichidului. În SI se măsoară în J/m^2

Coefficientul de tensiunea superficială este influențat de o serie de factori: temperatură, concentrație de săruri etc. Foarte importante sunt substanțele tensioactive care au proprietatea de a micșora tensiunea superficială: alcooli, acizi organici, detergenți. Tensiunea superficială a serului sanguin este $67 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ iar a urinei este $70 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$. În cazul hepatitei sau în cazul unor leziuni hepatice tensiunea superficială se modifică, ($\sigma = 50 \cdot 10^{-3}$) deoarece ajung în urină săruri biliare tensioactive.

~~Observație. Mai multe detalii despre tensiunea superficială vor fi studiate la lucrările practice de Laborator.~~

I.12.2 Fenomene de contact. Capilaritatea.

La contactul dintre solid și lichid apare o forță de interacțiune ca rezultat al forțelor ce se exercită între moleculele de lichid și de solid.

a) Dacă forța de coeziune dintre moleculele lichidului este mai mare decât forța de adeziune (ce se manifestă între moleculele de solid și cele de lichid) se spune că lichidul nu udă vasul în care se află. Astfel de lichide formează meniscuri convexe. (Fig. I.16)

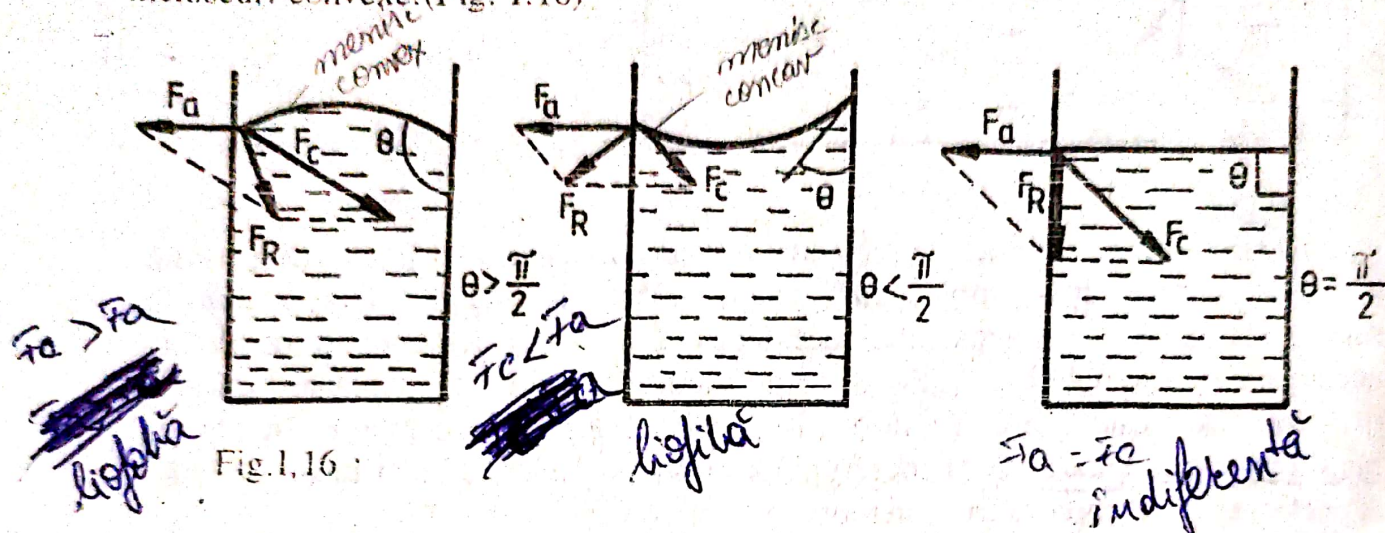


Fig. I.16

b) Dacă forța de adeziune este mai mare decât cea de coeziune, lichidul udă vasul în care se află și formează un menisc concav.

În raport cu lichidele, o suprafață solidă poate fi:

- liofilă dacă este udată de un lichid
- indiferență
- liofobă, dacă nu este udată de lichid.

Un solid poate fi liofil pentru un lichid și liofob pentru alt lichid. De exemplu sticla este liofilă pentru apă (hidrofilă) dar liofobă pentru mercur (mercurofobă).

Aceste fenomene de contact explică fenomenul de capilaritate. Lichidele urcă în capilarele liofile și coboară în cele liofobe, abătându-se de la principiul vaselor comunicante (Fig. I.17)

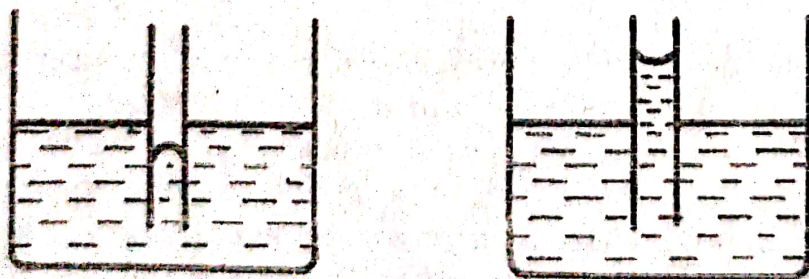


Fig. I.17

Tuburile capilare sunt tuburi care au diametrele foarte mici (de ordinul milimetrilor sau mai mici). Înălțimea la care urcă sau coboară lichidul este dată de legea lui Jurin:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho r g} \quad (1.64)$$

unde ρ este densitatea lichidului, r este raza tubului, g este accelerația gravitațională, σ coeficientul de tensiune superficială iar θ este unghiul de racordare (Fig. I.18)

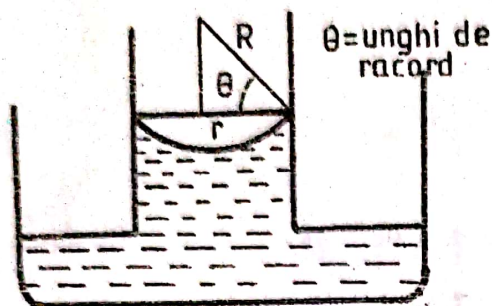


Fig. I.18

Pentru o adare perfectă $\theta = 0^\circ$,
de unde introducem constanta
capilară ($k = \frac{2\sigma}{g}$), relația devine:

$$h = \frac{k}{r}$$

legea lui
Jurin

O coloană de lichid, aflată într-un tub capilar dar care este fragmentată prin bule de gaz, opune o mare rezistență la înaintare deoarece trebuie învinsă, în afară de forța de adeziune și forța de tensiune superficială ce apare la nivelul fiecărui menisc realizat de bulele gazoase.

Acest fenomen se produce în cazul emboliilor gazoase, când pătrunderea de gaze în sânge poate bloca vasul capilar, fapt ce poate provoca moartea prin afixie sau epuizarea inimii.

Capilaritatea joacă un rol fundamental și pentru viața plantelor în special din două motive:

- capilaritatea asigură circulația sevei brute la plante,
- capilaritatea solului, ca factor pentru menținerea apei folosită apoi de plante (un sol fără capilare își pierde apa foarte repede).

I.13. Difuzia

Organismele vii sunt sisteme deschise care realizează în mod continuu schimb de substanță și energie cu mediul exterior. Difuzia este fenomenul de pătrundere a moleculelor unei substanțe printre moleculele altei substanțe sau a moleculelor proprii când distribuția moleculelor în spațiu este neomogenă. Difuzia este un fenomen de transport, (ca și vâscozitatea) fenomen în care se realizează un transport de substanță din zonele cu concentrație mai ridicată, spre zonele de concentrație mai mică, astfel încât neuniformitatea să se reducă. Fenomenul de difuzie este cel mai intens la gaze, unde viteza termică este foarte mare și cel mai lent la solide deoarece aici moleculele sau ionii au poziții relativ fixe în spațiu

Să considerăm că delimităm un volum de lichid ca în Fig. 1.19 în care concentrația fluidului variază după direcția Ox.

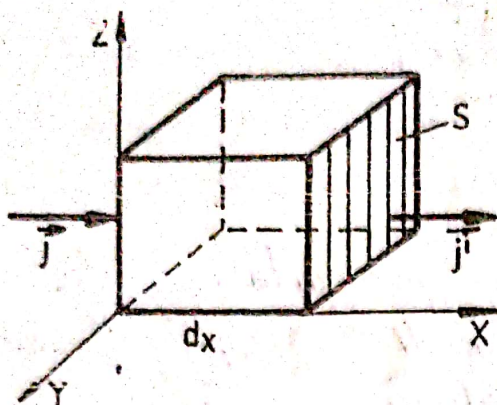


Fig. 1.19

Viteza de difuzie este proporțională cu gradientul de concentrație și suprafața de difuzie

$$j = -D \frac{dc}{dx} \quad \text{legea I-a a lui Fick.} \quad (1.65)$$

În (1.65) j este densitatea curentului de difuzie și este egal cu numărul de particule ce traversează unitatea de suprafață în unitatea de timp, adică

$$j = \frac{N}{St} \quad (1.66)$$

(N fiind numărul de particule, S suprafața și t timpul), c este concentrația substanței,

$$c = \frac{N}{V} \quad (1.67)$$

(V este volumul delimitat în fig. 1.19), iar D este coeficientul de difuzie.

Expresia dată în (1.65) poartă numele de **legea I-a a lui Fick**.

Semnul minus din legea lui Fick apare deoarece fluxul de substanță se realizează de la concentrație mai mare spre concentrație mai mică. Transportul de substanță prin difuzie conduce la modificarea concentrației în fiecare punct al spațiului astfel că în final, pentru $t \rightarrow \infty$, se ajunge la o egalizare a concentrației substanței. Generalizarea ecuației I-a alui Fick în cazul când concentrația substanței variază în toate direcțiile este:

$$\vec{j} = -D \nabla c(x, y, z, t)$$

Din combinarea legii I-a alui Fick cu legea conservării masei, se obține legea a II-a a lui Fick. Numărul de particule ce trec în unitatea de timp prin suprafața S care este

$$(j - j')S = dj \cdot S = \frac{\partial j}{\partial x} dx S = \frac{\partial N}{\partial t}$$

Să considerăm că delimităm un volum de lichid ca în Fig. I.19 în care concentrația fluidului variază după direcția Ox.

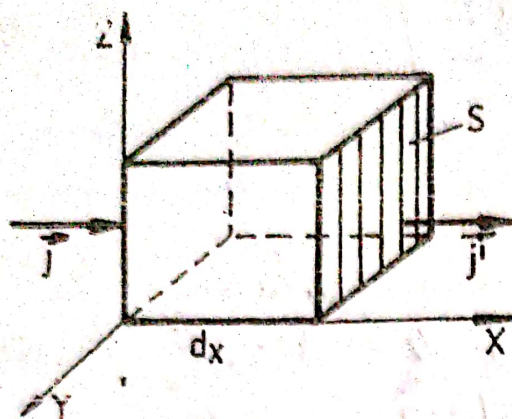


Fig. I.19

Viteza de difuzie este proporțională cu gradientul de concentrație și suprafața de difuzie

$$j = -D \frac{dc}{dx} \quad \text{legea I-a a lui Fick.} \quad (I.65)$$

În (I.65) j este densitatea curentului de difuzie și este egal cu numărul de particule ce traversează unitatea de suprafață în unitatea de timp, adică

$$j = \frac{N}{St} \quad (I.66)$$

(N fiind numărul de particule, S suprafața și t timpul), c este concentrația substanței,

$$c = \frac{N}{V} \quad (I.67)$$

(V este volumul delimitat în fig. I.19), iar D este coeficientul de difuzie.

Expresia dată în (I.65) poartă numele de **legea I-a a lui Fick**.

Semnul minus din legea lui Fick apare deoarece fluxul de substanță se realizează de la concentrație mai mare spre concentrație mai mică. Transportul de substanță prin difuzie conduce la modificarea concentrației în fiecare punct al spațiului astfel că în final, pentru $t \rightarrow \infty$, se ajunge la o egalizare a concentrației substanței. Generalizarea ecuației I-a alui Fick în cazul când concentrația substanței variază în toate direcțiile este:

$$j = -D \nabla c(x, y, z, t)$$

Din combinarea legii I-a alui Fick cu legea conservării masei, se obține legea a II-a a lui Fick. Numărul de particule ce trec în unitatea de timp prin suprafața S care este

$$(j - j')S = dj \cdot S = \frac{\partial j}{\partial x} dx S = \frac{\partial N}{\partial t}$$

fiind fluxul incident de particule pe suprafața S iar j' fluxul emergent pe aceeași suprafață. Dar după definiția (I.67) pentru concentrație avem:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial c}{\partial t} S dx \quad (I.68)$$

Din ultimele două relații se obține:

$$\frac{\partial j}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (I.69)$$

Derivând în raport cu coordonata prima lege a lui Fick, avem

$$\frac{\partial j}{\partial x} = -D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

și folosind expresia (I.69), se obține cea de a II-a lege a lui Fick

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = -\frac{\partial c}{\partial t}$$

Procesul de difuzie, datorită modificării concentrației, nu rămâne constant în timp. Acest lucru se exprimă cu legea a II-a lui Fick.

$$\frac{dc}{dt} = -D \frac{d^2c}{dx^2} \quad (I.70)$$

Legea a II-a alui Fick afirmă că, în orice punct al unui lichid, variația în timp a concentrației este proporțională cu variația spațială a gradientului de concentrație.

Soluțiile acestei ecuații sunt tabelate. În Fig.(I.20) se prezintă concentrația iar în Fig.(I.21), gradientul de concentrație.

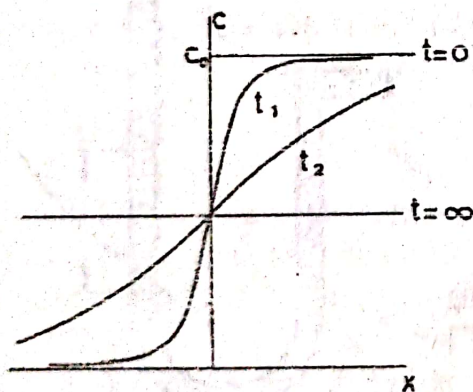


Fig. I.20

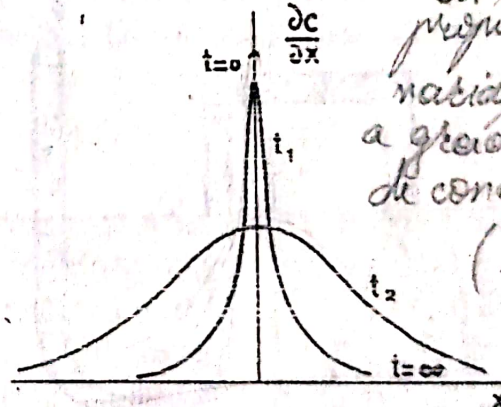


Fig. I.21

Coeficientul de difuzie se definește ~~dacă~~ ca fiind cantitatea de substanță ce străbate unitatea de suprafață, în unitatea de timp, dacă gradientul de concentrație este egal cu unitatea. Experiența arată că D variază direct proporțional cu temperatura, depinzând în același timp și de forma particulelor. Pentru particule coloidale de formă sferică coeficientul de difuzie este dat de formula lui Einstein:

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$$

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$$

(I.71)

In (1.71) k este constanta lui Boltzmann, T este temperatura absolută, r este raza sferei iar η este coeficientul de vâscozitate dinamică a lichidului. Deci viteza de difuzie este proporțională cu temperatura absolută dar este invers proporțională cu vâscozitatea ceea ce explică de ce difuzia într-un gel este mult mai înceată decât într-un fluid. In sistemele biologice însă, nu se realizează difuzia liberă, ci difuzia prin membrane. Fenomenul de difuzie are un rol esențial pentru organisme vii.

Fenomenul de difuzie intervine între organism și mediu sau între celule și mediul său, precum și între diferite compartimente celulare.

1.14. Osmoza.

Membranele nu sunt la fel de permeabile pentru toate substanțele, ci sunt selectiv permeabile. O membrană permeabilă pentru solvent dar impermeabilă pentru solvit se numește semipermeabilă.

Membranele biologice sunt permeabile nu numai pentru solvent ci și pentru substanțe cu moleculă mică.

Fenomenul de osmoză este fenomenul de difuzie printr-o membrană semipermeabilă.

Fie două soluții de concentrații diferite despărțite printr-o membrană semipermeabilă, ca în Fig. 1.22.

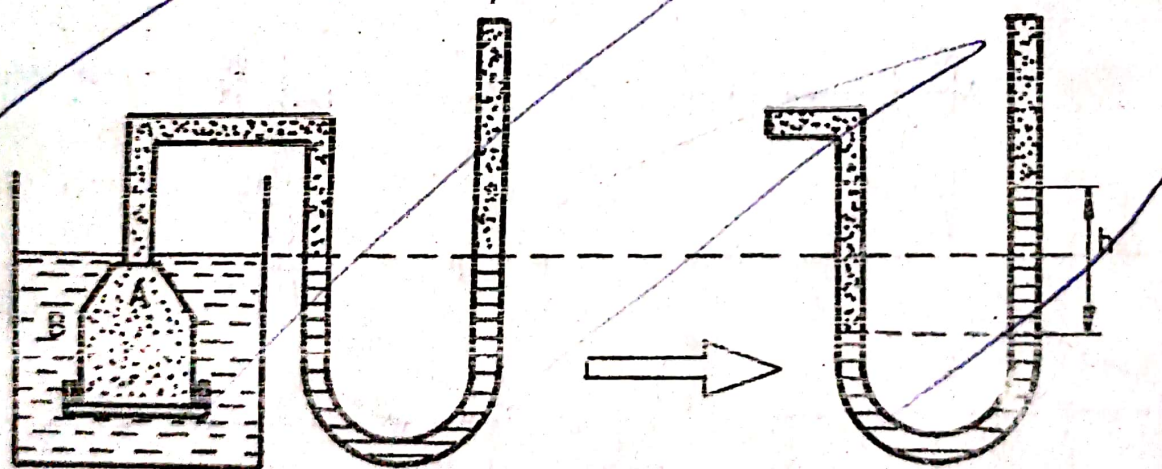


Fig. 1.22

Dacă în vasul A se pune o soluție concentrată iar în vasul B o soluție mai puțin concentrată, atunci moleculele solventului din vasul B vor trece prin membrana semipermeabilă, în vasul A. Osmoza continuă până ce nivelul lichidului din vasul A ajunge la înălțimea h când se realizează echilibrul. Acest echilibru se realizează când presiunea hidrostatică a coloanei de lichid cu înălțimea h egalează presiunea exercitată de fluxul osmotic, care este presiunea osmotică.

core
In (1.71) k este constanta lui Boltzmann, T este temperatura absolută. r este raza sferei iar η este coeficientul de vâscozitate dinamică a lichidului. Deci viteza de difuzie este proporțională cu temperatura absolută dar este invers proporțională cu vâscozitatea ceea ce explică de ce difuzia într-un gel este mult mai înceată decât într-un fluid. In sistemele biologice însă, nu se realizează difuzia liberă, ci difuzia prin membrane. Fenomenul de difuzie are un rol esențial pentru organismele vii.

Fenomenul de difuzie intervine între organism și mediu sau între celule și mediul său, precum și între diferite compartimente celulare.

1.14. Osmoza.

Membranele nu sunt la fel de permeabile pentru toate substanțele, ci sunt selectiv permeabile. O membrană permeabilă pentru solvent dar impermeabilă pentru solvit se numește semipermeabilă.

Membranele biologice sunt permeabile nu numai pentru solvent ci și pentru substanțe cu moleculă mică.

Fenomenul de osmoză este fenomenul de difuzie printr-o membrană semipermeabilă.

Fie două soluții de concentrații diferite despărțite printr-o membrană semipermeabilă, ca în Fig.1.22.

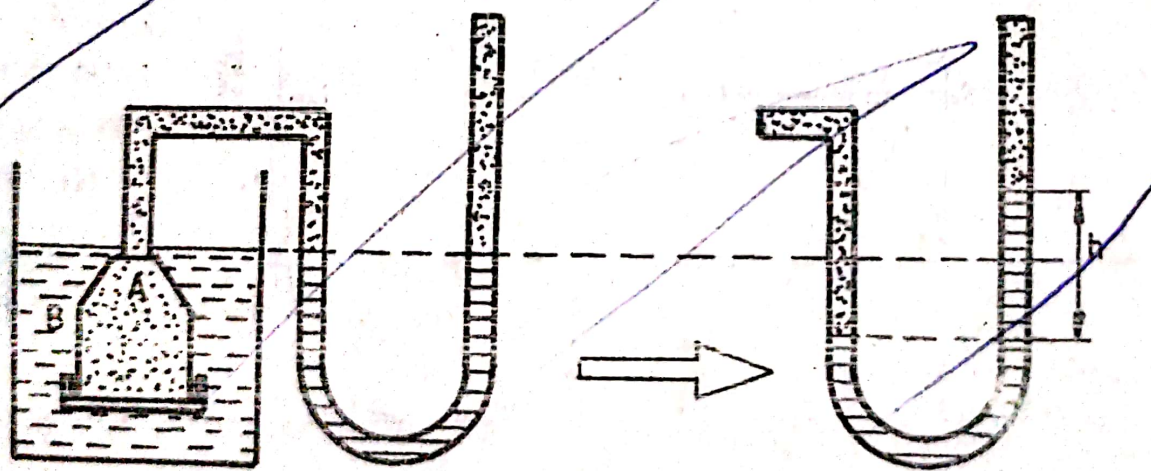


Fig.1.22

Dacă în vasul A se pune o soluție concentrată iar în vasul B o soluție mai puțin concentrată, atunci moleculele solventului din vasul B vor trece prin membrana semipermeabilă, în vasul A. Osmoza continuă până ce nivelul lichidului din vasul A ajunge la înălțimea h când se realizează echilibrul. Acest echilibru se realizează când presiunea hidrostatică a coloanei de lichid cu înălțimea h egalează presiunea exercitată de fluxul osmotice, care este presiunea osmotică.

★ Explicarea presiunii osmotice se poate face pornind de la teoria cinetico-moleculară, considerînd că moleculele solventului ciocnesc membrana semipermeabilă. Dacă se lucrează cu soluții puțin concentrate (~~deci moleculele sunt rare și pot fi asimilate cu moleculele unui gaz ideal~~) se poate aplica legea gazului ideal și acestui fenomen molecular, adică :

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (1.72)$$

p fiind presiunea gazului, V – volumul ocupat de gaz, m- masa gazului, M masa moleculară, R- constanta gazului ideal iar T temperatura absolută a gazului.

Presiunea osmotică, notată cu π , după (1.72), are expresia :

$$\pi = C_M RT \quad (1.73)$$

În (1.73) C_M este concentrația molară.

★ Legile presiunii osmotice au fost stabilite de Van't Hoff și ele derivă din explicitarea expresiei (1.73).

1) *La temperatură constantă, presiunea osmotică este proporțională cu concentrația masică sau molară a soluției.*

2) *Presiunea osmotică a unei anumite soluții de concentrație constantă ($C_M = \text{const.}$, pentru M dat) crește cu temperatura absolută a soluției.*

3) *Pentru temperatură constantă și concentrație constantă ($C_M = \text{const.}$, $T = \text{const.}$), presiunea osmotică este invers proporțională cu masa molară a substanței.*

Legile lui Van't Hoff permit determinarea masei moleculare a unor substanțe prin măsurători ale presiunii osmotice. Din legea gazului ideal pentru masa moleculară se obține expresia :

$$M = \frac{CRT}{\pi} \quad (1.74)$$

În anul 1925 Adair a determinat masa moleculară a hemoglobinei de cal. El a măsurat presiunea osmotică a unei soluții de hemoglobină ce conținea 80 grame de hemoglobină la un litru de soluție, la temperatura de 4°C și a găsit o valoare de 0.026 atmosfere. Introducînd în expresia (1.74) se găsește :

$M = 70.000 \text{ Kg/Kmol}$. Soluțiile macromoleculare nu respectă legea Van't Hoff. În acest caz presiunea osmotică este dată de expresia :

$$\pi = \frac{C}{M} RT + BC^2 \quad (1.75)$$

În (1.75) B este o constantă ce depinde de intensitatea forțelor de interacțiune dintre moleculele solventului și solvitului. Relația (1.75) se poate scrie și sub forma :

$$\frac{\pi}{C} = \frac{RT}{M} + BC \quad (1.76)$$

Dacă se reprezintă grafic mărimea π/C se obține o dreaptă a cărei intersecție are valoarea RT/M (Fig. I.23).

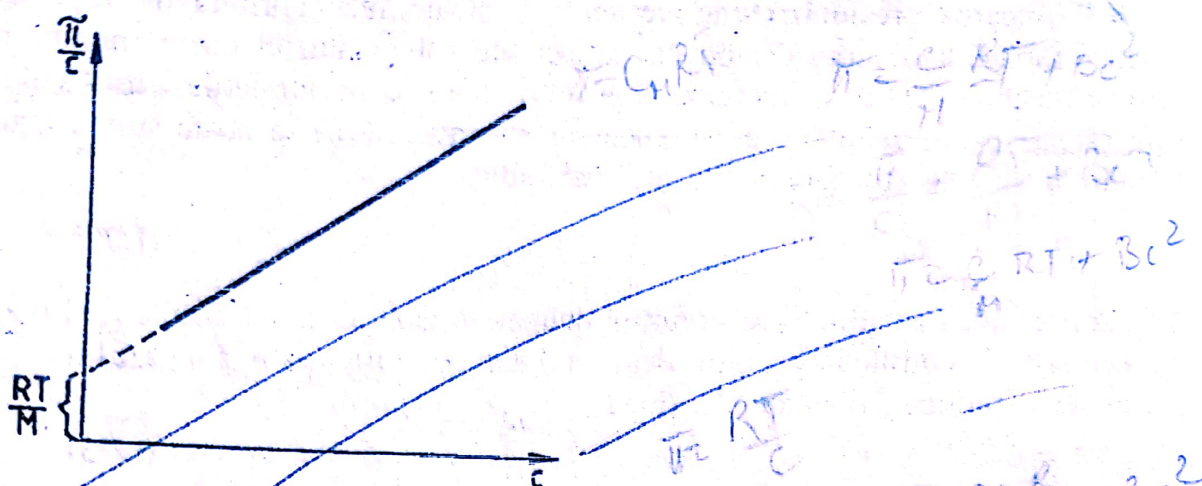


Fig. I.23

Această valoare permite aflarea masei moleculare a macromoleculei.

Dacă moleculele sunt dissociate, presiunea osmotică devine:

$$\pi = iCRT$$

(I.77)

Aici $i = \alpha + 1$ unde α este un indice de disociere și este egal cu raportul dintre numărul de molecule dissociate și cel al moleculelor dizolvate.

Soluția ce conține un număr de particule osmotice active egal cu numărul lui Avogadro, N_A , se numește soluție osmomolară.

Presiunea osmotică exercitată de o soluție osmomolară este la temperatura de 273K de 22.4 atmosfere = $22,6 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

Această valoare se obține după (I.73) astfel:

$$\pi_{os} = \frac{1 \text{ mol}}{10^{-3} \text{ m}^3} \cdot 8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 273 \text{ K} = 22,6 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

Două soluții ideale, diferite, de molaritate egală, care au aceeași presiune osmotică, se numesc izosmotice.

I.15. Echilibrul osmotic pentru sistemele vii

Pentru organismele vii, pentru care membrana celulară este selectiv permeabilă, soluția din suc celular va prezenta numai acea parte a presiunii osmotice datorată moleculelor pentru care membrana nu este permeabilă. Această proprietate a celulelor vii se numește tonicitate.

De aceea, două soluții izosmotice despărțite de o membrană selectiv permeabilă nu sunt de obicei și izotonice. În general, tonicitatea este mai mică decât presiunea osmotică, dar poate ajunge totuși la 8 - 12 atmosfere la unele bacterii. Celula poate rezista la astfel de presiuni deoarece ea este adaptată. Astfel plantele și microorganisme, pe lângă membrana plasmatică, mai prezintă o membrană rigidă. În cazul majorității animalelor însă, celulele nu posedă un perete rigid și de aceea acestea și-au dezvoltat mecanisme de reglare a tonicității prin eliminarea excesului de apă și a unor substanțe.

Dacă soluția de conservare a celulelor este hipotonică, apa pătrunde prin membrană producând umflarea cu apă (turgescența) frunzelor. Tonicitatea înaltă

a citoplasmei celulei vegetale este implicată, alături de capilaritate, la ascensiunea sevei brute. Dacă procesul continuă, însă, se poate produce citoliza. Atunci când sângele este introdus într-o soluție mai diluată, apa pătrunde și se produce turgescența. Dacă membrana eritocitară nu este suficient de rezistentă, aceasta se poate distruge și iese hemoglobina. Dacă soluția este hipertonică, apa intracelulară tinde să părăsească celula, ceea ce duce la fenomenul de plasmoliză. În cazul hematiilor, acest fenomen se numește ratatinare.

La animalele marine nevertebrate, echilibrul osmotic variază după condițiile exterioare: ele urmează variațiile de presiune osmotică ale exteriorului prin adaptarea osmotică. Pe măsura urcării pe scara animală, organismul capătă independență osmotică, presiunea osmotică menținându-se constantă cu ajutorul unor mecanisme de reglare. Menținerea în corpul organismelor vii a unor soluții de diferite concentrații și presiuni osmotice este absolut necesară; când echilibrul osmotic se strică, se produc dezechilibre și chiar moartea. Astfel, peștii de mare, introduși în apă dulce suferă un dezechilibru osmotic (uneori letal) la nivelul epiteliului brahial. Dacă se scoate sânge unui animal și se introduce apă distilată, se produc de asemenea tulburări grave.

c) O soluție izotonă pentru organismul uman este serul fiziologic, având concentrația molară 0,154 M, iar concentrația osmomolară $C = 0,290 \text{ osM}$, ceea ce corespunde la o concentrație masică de 9 ‰ NaCl .

1.16. Presiunea osmotică a lichidelor din organismul uman și animal

Presiunea osmotică a lichidelor din organismul uman și animal (sânge, lichid cefalo-rahidian, urina) se datorează în cea mai mare parte ionilor (Na^+ , Cl^- , K^+ , Ca^{2+}) și micromoleculelor cu dimensiuni mai mici de 10 angstromi și mult mai puțin macromoleculelor, dat fiind faptul că acestea din urmă au masă moleculară mare și conform legii a III-a a lui Van't Hoff, presiunea osmotică este mică.

Ioni și micromoleculele din sânge, ce reprezintă doar 1% din masa sângelui, determină la 37°C o presiune osmotică de 7-8 atmosfere, în timp ce macromoleculele (proteinele) care se află în proporție de 9% determină o presiune osmotică (oncotică) de numai 0,037 atmosfere (28 torr). Presiunea plasmei este de 7.6 atmosfere iar a lichidului interstițial de 6-7 atmosfere.

Deși foarte redusă, presiunea oncotică este importantă. Datorită faptului că substanțele cu masă moleculară mică pot difuza prin membrană și s-ar putea ajunge la egalizarea presiunilor osmotice datorată acestora, macromoleculele care nu pot difuza, asigură presiunea oncotică ce determină transportul de substanță dintre compartimentul vascular și cel interstițial.

Plasma sangvină, după cum am arătat, reprezintă o soluție apoasă care cuprinde ioni, micromolecule (glucoză, uree), macromolecule proteice (lipide, albumină, fibrinogen). Presiunea osmotică va fi dată de suma presiunilor osmotice ale acestor componente:

$$\pi_p = \sum_{k=1}^N \pi_k^i + \sum_{k=1}^{N_1} \pi_k^m + \sum_{k=1}^{N_2} \pi_k^M$$

unde: π_k^i reprezintă presiunea osmotică produsă de ionul de tipul k

π_k^m reprezintă presiunea osmotică produsă de micromoleculele de tipul k

π_k^M reprezintă presiunea osmotică produsă de macromoleculele de tipul k

Presiunea osmotică a macromoleculelor este dată de suma presiunilor osmotice date în special de albumine și globuline, deci se poate scrie:

$$\sum_{k=1}^{N_2} \pi_k^M = \sum_{k=1}^{N_{2A}} \pi_k^A + \sum_{k=1}^{N_{2G}} \pi_k^G$$

Deoarece ionii și micromoleculele pot difuza ușor prin membrană și deci nu pot genera diferențe de presiune osmotică, aceasta este generată în special de proteine și cum concentrația proteinelor în plasmă este mai mare decât în lichidul interstițial, și presiunea osmotică a plasmă va fi mai mare decât cea a lichidului interstițial.

Presiunea osmotică efectivă reprezintă diferența dintre presiunea osmotică a plasmă și cea a lichidului interstițial.

$$\pi_d = \pi_p - \pi_{li}$$

și are valoarea de circa 22 torri.

Ca urmare există o tendință ca apa să difuzeze din țesuturi spre lumenul capilar. Datorită contracției inimii se produce o presiune hidrostatică care variază de la un punct la altul în sistemul cardiovascular. Astfel presiunea sanguină arterială este determinată de un grup de factori cum ar fi:

- forța de contracție a inimii;
- rezistența vaselor de sînge;
- elasticitatea pereților arteriali;
- cantitatea de sînge din artere
- vîscozitatea sîngelui

Presiunea sanguină indică apăsarea pe care o exercită sîngele împins de pompa cardiacă asupra pereților vasculari. Dintre cele 3 mărimi importante ale circulației sîngelui: debit, volum și presiune, presiunea se măsoară curent atît la om cît și la animale.

Pentru om în sectorul arterial presiunea sistolică este de 120-150 torri iar presiunea diastolică este de 70 torri (artera humerală). La cal presiunea maximă este de 180 torri iar cea minimă este de 110 torri; la cîine maximă este de 150 torri iar minimă este de 100 torri.

Presiunea arterială, numită în mod curent tensiunea arterială este una dintre cele mai importante mărimi în diagnosticul și funcționarea aparatului cardiovascular.

La nivelul capilarelor arteriale $p_{sa} = 34$ torri, iar la nivelul celor venoase $p_{sv} = 12$ torri

Se poate defini și aici o presiune efectivă a sîngelui, ca diferența între presiunea hidrostatică a sîngelui și cea a lichidului interstițial;

$$p_d = p_s - p_{li}$$

Presiunea sîngelui determină un transport de substanță dinspre capilare spre spațiul interstițial, transport care este invers celui datorat presiunii osmotice (deoarece presiunea sîngelui este mai mare decît cea a lichidului interstițial, $p_{li} \approx 1-9$ torri).

Bilanțul acestor presiuni dă presiunea efectivă totală:

$$\Delta p = p_{ef} - \pi_{ef}$$

În funcție de valorile diferitelor componente, presiunea efectivă totală poate fi pozitivă sau negativă. Dacă:

$\Delta p > 0$ fenomenul se numește **ultrafiltrare** și se produce un transport de lichid dinspre lumenul vascular spre spațiul interstițial

$\Delta p < 0$ fenomenul se numește **reabsorbție** și are loc un transport de lichid dinspre spațiul interstițial spre lumenul capilar.

De exemplu în porțiunea arterială a capilarelor pentru om:

$$p_{sa} - p_{li} = 35 - 5 = 29 \text{ torri și}$$

$$\Delta p = 29 - 22 = 7 \text{ torri}$$

Deci aici are loc un proces de ultrafiltrare.
În regiunea venoasă

$$p_{sv} - p_{li} = 12 - 5 = 7 \text{ torri}$$

$$\Delta p = 7 - 22 = -15 \text{ torri}$$

Ca urmare aici se produce un fenomen de reabsorbție.

Pe baza acestor scheme pot fi explicate edemele care constau în invadarea tesuturilor cu apă; aceasta are loc atunci cînd se mărește ultrafiltrarea, se micșorează reabsorbția sau au loc ambele fenomene. Edemele se produc în următoarele cazuri:

1) scăderea concentrației albuminelor plasmatice sub 2,5% sau a proteinelor totale sub 5,5%, ceea ce face ca π_{pl} să scadă sub cea a lichidului interstițial, π_{li} , ceea ce produce transportul micromoleculelor și a apei de la lumenul capilar spre interstițiile tisulare.

2) inamitie severă, cînd concentrația proteinelor scade de asemenea foarte mult

3) nefrita, cînd proteinele plasmatice sunt secretate în urină, proteinele sanguine fiind eliminate scăzînd în acest fel și presiunea determinată de acestea

4) permeabilizarea membranei capilarelor de către arsuri; în aceste situații proteinele din plasmă pot trece în spațiul interstițial mărind presiunea osmotică a acestuia din urmă

5) infarctul inimii drepte sau obstrucția venelor mari ceea ce face ca fluxul de sînge venos spre inimă să fie blocat; aceasta face ca presiunea p_{vr} să crească foarte mult, ceea ce face ca să scadă fenomenul de reabsorbție

Presiunea osmotică este responsabilă și de eliminarea deșeurilor ce rezultă ca produse ale catabolismului. Celulele iau hrana din lichidul interstițial dar tot acolo elimină și deșeurile. Deșeurile trec prin difuzie în plasma sanguină de unde sunt eliminate cu ajutorul organelor excretoare: rinichi, plămîni, intestin.

Deșeul cel mai important al catabolismului este dioxidul de carbon (CO_2) care este eliminat prin plămîni. Intestinul excretă Ca, Mg, Fe etc iar pielea elimină apa cu NaCl și uree. Cele mai importante cantități de deșeuri sunt eliminate de rinichi (55-70g/h). De altfel, rinichii mai contribuie și la reglarea cantității de electroliți și a presiunii sîngelui prin intermediul unui hormon numit renină. Aceste funcții sunt realizate de nefroni, care au o pondere de circa 1 milion pentru fiecare rinichi. Aici se realizează fenomenul de ultrafiltrare, deoarece presiunea efectivă totală Δp este pozitivă, de circa 47 torri.

Acest echilibru se poate modifica în anumite cazuri. Dacă presiunea sîngelui devine mai mică, Δp devine negativă și procesul de ultrafiltrare nu mai are loc. Acest fenomen se poate produce de exemplu în cazul scăderii tensiunii arteriale (hipotensiune). Fenomenul conduce la o deficiență în elaborarea urinei ducînd chiar la oprirea ei completă (rinichi blocat), ceea ce pune viața în pericol. În asemenea cazuri se folosește rinichiul artificial care prin dializă elimină din sînge produșii catabolismului. Aici sîngele intoxicat este adus în contact, cu o soluție izotonică (o soluție salină cu presiunea osmotică egală cu cea a plasmei sangvine), eliminarea deșeurilor realizîndu-se printr-o membrană de celofan sau cuprofan.

CAPITOLUL II. FORTE INTERATOMICE SI INTERMOLECULARE

Pentru înțelegerea proceselor biofizice care au loc în organismele vii, este necesară cunoașterea și caracterizarea componentilor atomici și moleculari. De asemenea pentru înțelegerea formării structurilor biologice din componentele lor atomice și moleculare este necesară cunoașterea diferitelor tipuri de interacțiuni ce duc la fenomene specific biologice.

În natură, pornind de la Universul cosmic până la microuniversul particulelor elementare, se disting 7 nivele de organizare a materiei, cărora le corespund și interacțiuni (forțe)specifice. Acestea sunt date date în tabelul II.1

Tabelul II.1

Nivel	Materia	Domeniul fizic	Interacțiunea
1	Gaz stelar	Astrofizica	Gravitație
2	Molecule	Chimia	Legături chimice
3	Atomi	Fizica atomică	Coulomb
4	Nucleu	Fizica nucleară	Nucleară
5	Nucleoni(protoni, neutroni)	Fizica subnucleară	Tare
6	Quarci	Fizica particulelor elementare	Tare, slabă, culoare
7	Preoni	Fizica particulelor elementare	Hiperculoare ? ??

Din punct de vedere biofizic sunt importante interacțiunile interatomice și intermoleculare. Rezultatul acestor interacțiuni este fie formarea unor legături chimice, deci a unor componenți moleculari, fie dispunerea spațială a acestora datorată forțelor intermoleculare care se manifestă între ei.

În sistemele biologice se întâlnesc foarte rar atomi sau ioni ca entități independente. Sistemele biologice sunt formate din structuri biomoleculare constituite din foarte multe molecule care sunt legate prin interacțiuni specifice.

Forțele care acționează între elementele ce formează molecula se numesc forțe interatomice sau intramoleculare iar cele care acționează între biomolecule se numesc forțe intermoleculare

Forțele interatomice și intermoleculare derivă din faptul că atomii conțin sarcini electrice de semne contrare : nucleul pozitiv și învelișul electronic, încărcat negativ. Atomii sunt neutri din punct de vedere electric, între nucleu și electroni exercitându-se interacțiuni de atracție electrostatică(Coulombiană). În

cazul atomilor, în funcție de distanța dintre ei, pot predomina forțele de atracție sau de respingere.

Dacă distanța dintre doi atomi este foarte mare, interacțiunea este practic inexistentă și atomii au o energie constantă. Pe măsură ce distanța dintre atomi scade, forțele de atracție dintre atomi cresc, energia potențială scade. Dacă distanța se micșorează în continuare, forțele de atracție încep să scadă, apoi se anulează și apar forțele de repulsie. Configurația la care la care forțele interatomice se echilibrează, iar energia potențială este minimă, reprezintă starea stabilă ce corespunde formării unei molecule.

Molecula este o grupare de atomi ce formează o configurație stabilă datorită forțelor de interacțiune interatomice. Structura moleculelor este determinată de distanța dintre atomi și orientarea în spațiu a legăturii, gradul de rotație în jurul unei anumite direcție a unor atomi, energia de legătură dintre atomi, etc.

Posibilitatea legării atomilor este dată de faptul că sarcinile lor pozitive sunt concentrate în nucleul atomic de dimensiuni foarte reduse, în timp ce sarcinile negative ale norilor electronici din jurul nucleului sunt difuze, dispersate într-un volum mare care cuprinde aproape întregul atom. Datorită acestui fapt, periferia atomilor nu este perfect ecranată, astfel că acțiunea câmpului nuclear se poate exercita și asupra norilor electronici ai atomilor vecini. Când atomii sunt mult apropiați, au loc modificări în distribuția electronilor exteriori, în urma cărora se creează legătura chimică dintre atomi.

Natura și intensitatea forțelor de interacțiune depind de masa partenerilor, sarcina lor electrică, structura electronică, dimensiunile și geometria partenerilor etc.

Atât forțele interatomice cât și cele intermoleculare pot fi forțe de atracție (de legătură) și forțe de respingere.

II.1. Forțe interatomice de legătură (de atracție)

Forțe interatomice de legătură (de atracție) se împart în patru categorii :

Trei dintre ele sunt puternice (sunt denumite și legături chimice) iar a patra este o legătură mai slabă (numită uneori și legătură fizică)

Legăturile chimice sunt : **electrovalentă, covalentă, legătura metalică**

Cea de a patra legătură se mai numește legătură Van der Waals.

II.1.1. Legătura ionică

Electrovalența (legătura ionică sau heteropolară) se realizează în urma transferului de electroni de la un atom care cedează electroni (electro-pozitiv) la un atom care acceptă electroni (electronegativ). În urma transferului de electroni se formează ioni de semne contrare, care se atrag între ei prin forțe electrostatice. Cauza transferului de electroni a fost explicată de Kossel (1916), combinarea chimică, atomii tind să-și modifice stratul electronic exterior, astfel încât să dobândească o configurație electronică stabilă, corespunzătoare cu cea a unui gaz rar sau cât mai apropiată de aceasta.

Acest tip de legătură nedirecționată (neorientată în spațiu) se întâlnește mai ales la săruri. De exemplu formarea NaCl, decurge după următorul proces:



Bilanțul energetic la formarea rețelei cristaline ionice de NaCl, pornind de la atomi liberi, trebuie să ia în considerare următoarele etape:

- formarea ionilor Na^+ , Cl^- ;
- atracția dintre ionii astfel formați;

Prima etapă este caracterizată de energia de ionizare a atomului de sodiu:



care are valoarea:

$$I_{\text{Na}} = 494,03 \text{ KJ atom g}^{-1}$$

și de afinitatea pentru electron a clorului, adică energia care se degajă în urma acceptării electronului în învelișul electronic al clorului:



care are valoare negativă: $A = -347,49 \text{ KJ atom g}^{-1}$.

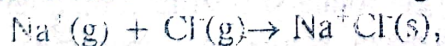
Ionii astfel formați se atrag între ei prin forțe de natură electrostatică, apropiindu-se pînă la o distanță compatibilă cu repulsia învelișurilor lor electronice.

Dacă formarea clorurii de sodiu ar decurge numai pe baza transferului de electroni, această substanță nu ar trebui să se formeze, deoarece prezintă un bilanț energetic defavorabil; suma algebrică a celor două energii este pozitivă:

$$I + A = 494,03 - 347,49 = 146,54 \text{ KJ mol}^{-1}$$

Schimbul de energie, singur, nu explică deci reacția. Dacă ar veni în contact atomi de sodiu și de clor izolați și produșii de reacție ar fi ionii de clor și de sodiu izolați, transferul de electroni nu ar avea loc și nu s-ar forma NaCl. În realitate transferul de electroni este totdeauna însoțit de un proces exoterm, care face ca balanța energetică să încline în favoarea formării legăturii ionice.

Rezultă că formarea ionilor izolați Na^+ , Cl^- nu se produce spontan, ci numai dacă reacția endotermă de mai sus, respectiv transferul unui electron de la sodiu la clor, este însoțită de un proces exoterm care să compenseze deficitul energetic al primei reacții. Într-adevăr formarea rețelei cristaline ca urmare a atracției electrostatice dintre ionii gazoși de sarcini opuse,



se produce cu o mare degajare de energie, denumită energie de rețea, U , care determină mersul procesului.

Acest tip de legătură nu joacă un rol important în alcătuirea biomoleculelor.

II.1.2. Legatură covalenta

Covalența (legătura atomică sau homeopolară) se stabilește între atomi neutri prin punerea în comun de electroni, rezultând o densitate maximă a norului de legătură între cei doi atomi. Caracterizată prin rigiditate și orientare în spațiu, covalența stă la baza formării a numeroși compuși în orice stare de agregare. Ea

poate fi localizată între doi atomi dintr-o moleculă, sau delocalizată, adică policentrică (pe mai mulți atomi din moleculă).

Covalența, spre deosebire de electrovalență, este o legătură adevărată. Atomii legați covalent, ocupă poziții fixe unii față de alții, formând la un loc o moleculă cu structura bine definită.

Prima tratare teoretică a legăturii covalente a fost făcută de Heitler și London în cazul moleculei de hidrogen. Ei au calculat funcția de undă a orbitalului molecular ce ia naștere din prin cuplarea electronilor neîmperechiați din stratul de valență ale atomilor. Calculul explică posibilitatea principială de formare a unei molecule din doi atomi de același fel (moleculă homonucleară) dar chiar și în aceste cazuri se recurge la unele ipoteze simplificatoare.

Inițial cei doi atomi aflați în stare fundamentală se consideră la o distanță suficient de mare astfel încât interacțiunile lor mutuale să fie neglijabile. În acest caz energia sistemului este egală cu suma energiilor atomilor separați. Dacă distanța dintre cei doi atomi A și B se micșorează treptat, norii electronici respectiv încep să se suprapună. Electronii vor aparține într-o măsură din ce în ce mai mare ambelor nuclee, realizând legătura chimică.

Legătura chimică covalentă, astfel formată, se realizează printr-o pereche de electroni. În acest fel rezultă un sistem nou cu stabilitate maximă. Probabilitatea ca electronii (1) și (2) să se găsească într-un volum dat, în același timp, este dată de produsul probabilităților pentru atomii separați.

Legătura covalentă, conform principiilor mecanicii cuantice, constă deci dintr-o interacțiune a celor doi electroni cu spini antiparaleli. Între cei doi electroni cuplați se realizează o atracție puternică și se formează un sistem stabil. Un asemenea sistem are un caracter dinamic, nu electrostatic, ca în cazul legăturii ionice. Mecanica cuantică precizează sensul fizic al valenței.

O covalență este dată de o pereche de electroni cu spini cuplați (antiparaleli). Legătura covalentă se formează prin suprapunerea orbitalilor atomici.

În teoria orbitalilor moleculari (TOM) covalența se interpretează ca rezultat al mișcării simultane a electronilor în câmpul tuturor nucleelor din moleculă care formează geometria acesteia.

Funcțiile de undă ψ , care descriu OM sunt soluții ale ecuației lui Schrodinger, care fac legătura între energia potențială, energia totală și poziția componentelor sistemului. Aceste funcții de undă caracterizează starea microparticulelor în mișcarea lor liberă sau în câmp de forțe. Max Born a dat o interpretare probabilistică a undei de Broglie asociată microparticulelor arătând că pătratul amplitudinii undei asociate electronului, $|\psi|^2$, dă densitatea de probabilitate de a găsi electronul într-un anumit loc la un anumit timp.

În același timp, $e|\psi|^2$ dă distribuția densității de sarcină a electronilor într-o moleculă.

Mulliken a propus ca pătratul modulului funcției de undă să fie numit orbital molecular.

Legăturile covalente formate de alți atomi se interpretează similar moleculei de hidrogen, ca rezultat al suprapunerii orbitalilor atomici ai electronilor necuplați. Un atom poate realiza atâtea covalențe câte cuplări de spin poate forma pînă la dobîndirea unei configurații electronice stabile cu electronii cuplați.

Nivelele interioare de electroni nu contribuie la formarea legăturilor ci numai la atenuarea prin efect de ecranare a atracției electrostatice a electronilor exteriori de către nucleu. În funcție de modul cum are loc suprapunerea orbitalilor atomici, care participă la formarea covalenței, se deosebesc mai multe tipuri de covalențe.

a) Covalența de tip σ se poate forma prin:

1) suprapunerea a doi orbitali atomici de tip s. În Fig. II.1 este prezentată formarea legăturii de tip σ prin suprapunerea orbitalilor atomici de tip s. (molecula de H_2) Legătura σ simplă, este cea mai stabilă legătură covalentă, bicentrică, bielectronică.

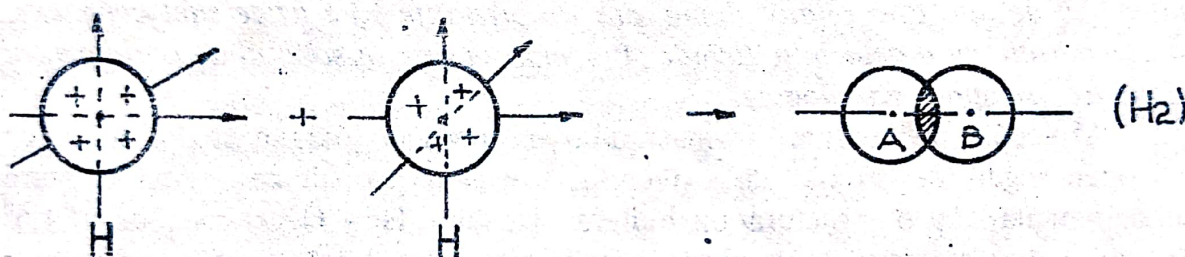


Fig. II.1

2) suprapunerea unui orbital de tip s cu un lob al unui orbital de tip p care este redată în (Fig. II.2) pentru molecula de H_2S

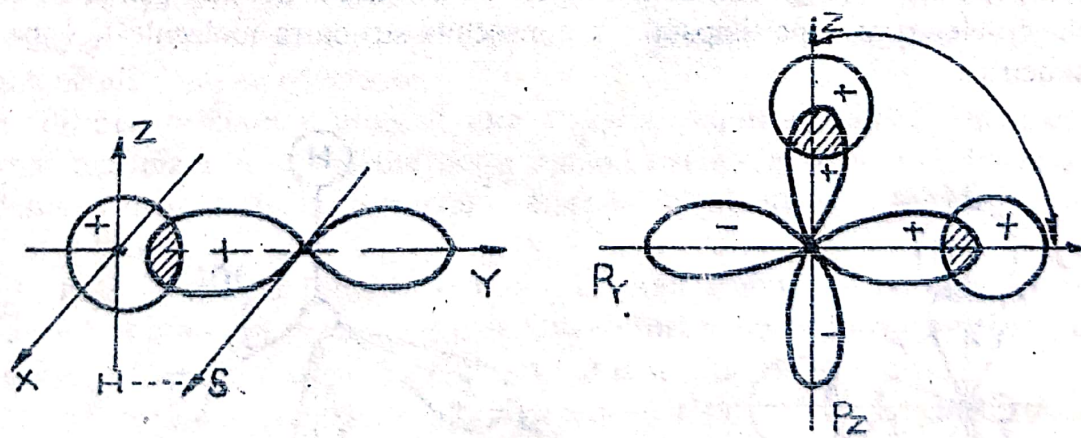


Fig. II.2

3) suprapunerea a doi orbitali de tip p.

b) Covalența π se constituie ca o legătură secundară în cazurile în care după formarea legăturilor σ rămân electroni necuplați la ambii atomi. Ea rezultă prin suprapunerea orbitalilor p,d sau f prin câte doi lobi.

În molecula de azot, de exemplu, legătura dintre cei doi atomi de azot se realizează printr-o covalență σ , rezultată prin suprapunerea orbitalilor p (prin câte un lob) și două covalențe π formate prin suprapunerea orbitalilor p_x și p_z prin câte doi lobi provenind de la doi atomi identici sau diferiți.

Prezența legăturilor π nu influențează geometria moleculei, determinată de legăturile σ , reducând numai distanțele interatomice, mărinind unghiul de valență și conferă rigiditate moleculei.

Suprapunerea lobilor este mai redusă în cazul covalențelor π , față de covalențele σ și din această cauză covalențele de tip π au o energie mai mică decât covalențele σ , fiind mai reactive decât acestea.

II.1.3. Structura moleculei de apă

Apa este lichidul cel mai răspândit de pe suprafața amântului. Structura moleculei de apă este relativ simplă dar proprietățile sale fizice sunt complexe, în comparație cu a celorlalte lichide. Prezența sa este absolut obligatorie pentru realizarea sistemelor biologice.

Molecula de apă este formată dintr-un atom de oxigen și doi atomi de hidrogen legați de atomul de oxigen prin legături covalente. Apa în stare fundamentală are o structură unghiulară. Unghiul $H - O - H$ este de $104,5^\circ$. Structura liniară este contrazisă de momentul de dipol electric permanent ($\mu = 1,84D$). Unghiul experimental observat în molecula de apă este explicat prin unghiul de 90° dintre orbitalii de legatură ai oxigenului $2p_x$ și $2p_y$ care se resping datorită caracterului parțial ionic al legăturii ($O - H$); datorită acestui caracter cei doi protoni se resping și largesc unghiului de valență la $104,5^\circ$. Ținând seama că în jurul oxigenului din molecula de apă există patru dublete electronice, aranjamentul cel mai logic ar fi sub forma de tetraedru regulat (Fig. II.3) în care două varfuri ar fi ocupate de doi atomi de hidrogen și de două perechi de electroni neparticipanți. În consecință structura moleculei de apă nu este simetrică.

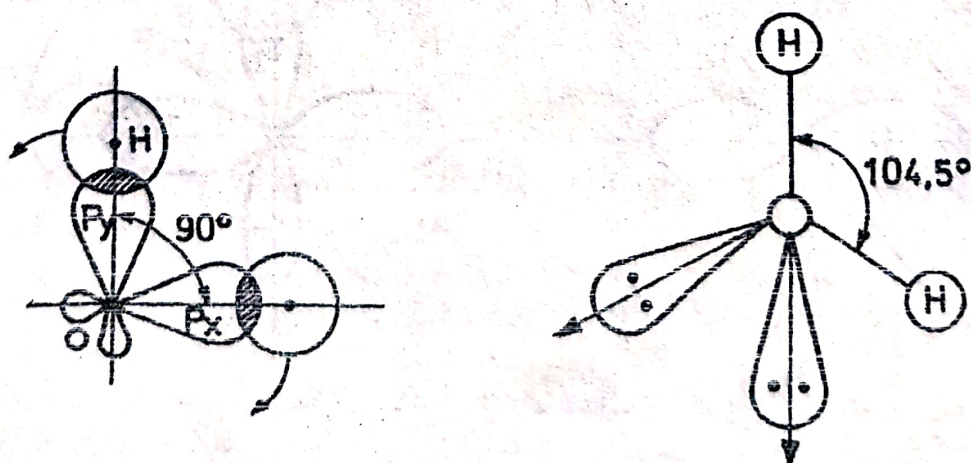


Fig. II.3

Datorita structurii asimetrice, sarcinile pozitive predomina la nivelul protonilor celor doi atomi de hidrogen, pe când cele negative predomina la capatul opus al moleculei. Fiecare legatura OH are un caracter puternic polar. Datorita acestei structuri, din punctul de vedere al repartitiei sarcinilor electrice pozitive si negative, molecula de apa formeaza un dipol electric, deci este o molecula polara.

Din acest motiv apa este un dipol permanent. Molecula de apa creeaza în vecinatatea ei un câmp electric intens care determina legatura de hidrogen. Tot prin covalențe sunt legați atomii și ionii în compuși formați din mai mulți atomi sau ioni complecși. Aceștia sunt de fapt, niște molecule purtând sarcini electrice.

II.1.4. Hibridizarea orbitalilor

În multe cazuri direcțiile după care sunt orientate covalentele din moleculele diverselor substanțe nu corespund cu cele ale orbitalilor atomici inițiali, care prin suprapunere și cuplarea spinilor electronici neîmperecheați formează legături covalente. Pe de altă parte factorul principal care determină numărul de covalente pe care îl formează un atom, este determinat de configurația electronică a stratului de valență al acestuia.

Există numeroase cazuri, când numărul de covalente este mai mare decât numărul electronilor necuplați din stratul de valență, iar unghiurile dintre covalente sunt diferite de cele dintre orbitalii atomici inițiali.

Potrivit configurației electronice exterioare ale elementelor Be, B, C, S, P și altele, numerele de covalență pe care îl formează aceste elemente este totdeauna mai mare decât prevede teoria. Aceste comportări au dus la ideea că electronii se pot decupla, mărinđ numărul covalențelor posibile, orbitalii atomici își schimbă forma și orientarea inițială, egalându-se în energie -se hibridizează.

Esența teoriei hibridizării constă în afirmația că orbitalii atomici utilizați de atomi pentru formarea legăturilor chimice nu sunt niște orbitali atomici puri, ci niște combinații liniare ale acestora, numiți orbitali hibridi. Deoarece orbitalii hibridi au proprietăți directionale bine definite, este de înțeles că teoria hibridizării reprezintă un alt aspect al principiului dirijării valenței în combinațiile chimice covalente.

Hibridizarea orbitalilor atomici este folosită pentru a explica formarea unui număr mai mare de covalente decât numărul electronilor impari din stratul de valență al unui atom, uniformizarea energiei și orientarea simetrică în spațiu a noilor orbitali.

Potrivit teoriei hibridizării, din orbitali atomici cu energie apropiată, ai aceluiași atom, și geometrie diferită, se formează orbitali de aceeași formă, aceeași energie (degenerați) orientați cât mai simetric în spațiu.

Hibridizarea presupune modificarea unor orbitali din stratul exterior, în momentul formării legăturii, adică trecerea atomilor într-o stare excitată, stare de valență. Aceasta trecere presupune concomitent modificarea formei, egalizarea energetică a orbitalilor hibridi și distribuția lor spațială cât mai simetrică în jurul nucleului. Pe noii orbitali hibridi egali ca număr cu cei inițiali, electronii se

repartizeaza în ordinea crescătoare a energiei, conform regulii lui Hund și principiului excluziunii al lui Pauli.

Un exemplu de hibridizare este dată în Fig.II.4 care prezintă structura etenei.

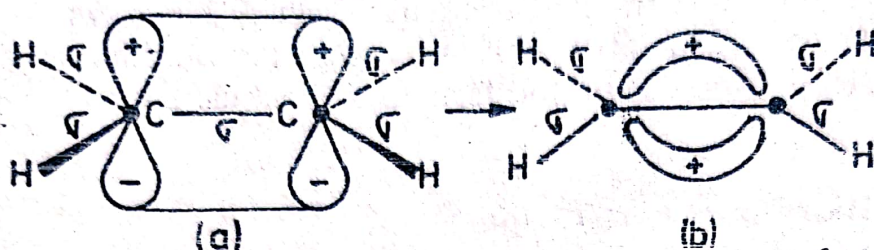


Fig.II.4

II.1.5. Legătura metalică

Pentru a explica proprietățile metalelor, s-a admis existența unor electroni liberi în metale, fie că acestea sunt solide sau lichide.

Metalele sunt solide cristaline a căror rețea este formată din ioni pozitivi și electroni care sunt foarte puțin legați de ioni. Legătura metalică unește atomii din rețeaua metalică prin delocalizarea norilor electronici de legătură de pe un număr foarte mare de atomi. Ea este caracterizată de faptul că nu este saturată, orientată în spațiu și nici localizată.

Tinând seama de faptul că legătura metalică se realizează prin interacțiunea "ionilor" metalici cu "electronii" liberi din metale, aceasta se aseamănă cu legătura covalentă iar prin faptul că nu este orientată în spațiu și nu prezintă fenomenul de saturație, se aseamănă cu legătura ionică. După cum am mai spus, natura forțelor de interacțiune dintre atomii unei molecule determină în mare măsură proprietățile acestora. Cunoașterea modului în care se realizează aceasta interacțiune poate explica proprietățile diferiților compuși chimici și biochimici.

Oricare ar fi tipul de interacțiune care are loc între atomii constituenți ai unei molecule, acestea au loc în așa fel încât întreg sistemul să realizeze o energie minimă și mai mică decât cea asociată constituenților izolați. Tipurile de legături prezentate mai înainte sunt doar niște cazuri limită. În realitate nu se cunoaște nici un compus în care legătura să fie 100% de un tip dat. Legătura chimică poate fi, de exemplu, preponderent ionică în CsF, NaCl, etc, sau preponderent covalentă în moleculele de H_2 , X_2 , O_2 , N_2 etc, dar niciodată nu este pur ionică sau pur covalentă existând o tranziție de la un tip de legătură la altul. De exemplu, legătura covalentă polară din molecula de acid fluorhidric, face trecerea dintre legătura ionică și cea covalentă, etc.

Facem observația că molecula își păstrează semnificația strictă numai în stare gazoasă, unde într-adevăr se poate vorbi de o entitate fizică independentă.

II.2. Forțe intermoleculare

Forțele care se exercită între moleculele ce formează un compus biologic sunt forțele intermoleculare. Deși aceste forțe sunt mai mici decât cele intramoleculare, efectul lor devine semnificativ datorită numărului mare de interacțiuni. Energia mică ce corespunde acestor interacțiuni permite formarea și ruperea lor destul de ușor, fapt care condiționează funcțiile biomacromoleculelor.

Forțe intermoleculare de atracție dunt de două tipuri :

- forțe de distanță mare cum sunt forțele Van der Waals
- forțe de distanță medie care cuprind legăturile de hidrogen

II.2.1 Legăturile de tip Van der Waals

Legăturile de tip Van der Waals se stabilesc între atomi sau molecule fără afinitate chimică, cum sunt atomii gazelor rare, moleculele nepolare H_2 , X_2 , O_2 , N_2 , CO_2 , CH_4 ; s.a. Forțele Van der Waals sunt de natura electrostatică, (la fel ca și legătura ionică) și se realizează între dipoli electrici.

Deși în ansamblu neutre moleculele pot fi considerate dipoli electrici, deoarece centrul sarcinilor pozitive nu coincide cu centrul sarcinilor negative. Există mai multe tipuri de astfel de interacțiuni. Astfel unele molecule sunt dipoli permanenți (de exemplu apa). Interacțiunea între acești dipoli depinde momentele lor dipolare și de orientarea lor relativă. O altă interacțiune există între o moleculă dipolară și o alta care nu este un dipol deoarece câmpul electric creat de prima deplasează sarcinile celei de a doua producând un dipol indus. În sfârșit ale molecule nu sunt dipoli dar ele pot deveni dipoli instantanei.

Pentru aceste trei tipuri de interacțiuni, calculele au arătat că forța de interacțiune variază invers proporțional cu puterea a șaptea a distanței dintre dipoli. Forțele Van der Waals sunt întâlnite în soluțiile foarte concentrate și sunt deosebit de implicate în cadrul proceselor biochimice din sistemele vii.

II.2.2 Legătura de hidrogen

Legătura de hidrogen este o legătură intermediară între legătura ionică și legătura Van der Waals și se stabilește între molecule, respectiv între protonul unei molecule și un atom puternic electronegativ al unei molecule vecine. Atunci când un atom de hidrogen este angajat într-o legătura covalentă, protonul acestui atom încarcat pozitiv și înconjurat de o densitate electronică slabă, creează în vecinătatea sa un câmp electric intens care este capabil să atragă un alt atom încarcat negativ, formând legătura de hidrogen.

Exemplul tipic pentru legătura de hidrogen este în cazul a doua molecule de apă. Formarea punților de hidrogen explică agregările moleculare care determină proprietățile neobișnuite ale apei și joacă un rol esențial în stabilirea structurii spațiale a biopolimerilor.



Energia de legatura a unei ponti de hidrogen este circa 0,1 din valoarea energiei de legatura a celei covalente. Din acest motiv aceasta legatura este foarte usor de desfacut, putându-se realiza alte noi legaturi.

Legaturile de hidrogen influenteaza comportarea moleculelor cu astfel de legaturi. De exemplu, posibilitatea de rotire a moleculelor este amplificata de legaturile de hidrogen, care determina o restrangere a moleculelor.

II.3. Interactiunea hidrofoaba

Un caz particular de legătură ce apare între anumite structuri biologice o constituie legătură hidrofoabă

Interactiunile hidrofoabe apar atunci când anumite grupari nepolare se gasesc în prezenta unui mediu polar, gruparile nepolare având tendinta de asociere între ele. Prin dizolvare, orice molecula face ca moleculele de apa cu care vin în contact sa realizeze un numar mai mic de ponti de hidrogen (eventual realizându-se ponti de hidrogen între apa si molecula dizolvata). Ca urmare energia potentiala va fi mai mare. Pentru a-si realiza minimul energetic sistemul se organizeaza astfel încât suprafetele de contact cu apa sa fie cât mai mici, deci aceste grupari hidrofoabe sa fie cât mai mult în contact doar între ele. Deci moleculele hidrofoabe se alatura, nu datorita unei forte de atractie, ca în cazurile descrise mai înainte, ci datorita respingerii lor de catre solvent.

Interactiunea hidrofoaba contribuie la realizarea structurii spatiale a proteinelor, a structurii AND-ului, etc.

CAPITOLUL III. METODE DE STUDIU IN BIOFIZICA

Biofizica dispune în prezent de numeroase metode de studiu ale proprietăților fizice ale constituenților sistemelor biologice. În cele ce urmează ne vom referi numai la unele dintre ele, dat fiind că spațiul ne permite doar să le abordăm pe cele mai uzuale.

III.1. Sedimentarea, difuziunea, ultracentrifugarea.

Masele unor particule sau macromolecule se determină uzual prin observarea mișcării lor sub influența unor forțe exterioare

III.1.1. Sedimentarea

Se presupune că asupra particulei de masă m acționează greutatea $G=mg$, forța arhimedică, $F_A = m_0 g$ și forța de frecare, $6\pi\eta r v$ (forța Stokes).

La echilibru acestor forțe se poate scrie :

$$6\pi\eta r v = (m - m_0)g \quad (\text{III.1})$$

Când echilibrul este atins, particula va sedimenta cu o viteză constantă v (care este viteza de mișcare a particulei în momentul atingerii echilibrului), egală cu :

$$v = \frac{m(1 - \frac{\rho_0}{\rho})g}{6\pi\eta r} \quad (\text{III.2})$$

Aici ρ este densitatea corpului care se emulsionează ; ρ_0 a lichidului iar g este accelerația gravitațională.

Se admite că particulele coloidale au formă sferică și că au raza r , deci volumul V este :

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad 9\eta \quad (\text{III.3})$$

Condiția de echilibru (III.1) devine :

$$\frac{4}{3}\pi r^3 (\rho - \rho_0)g = 6\pi\eta r v \quad (\text{III.4})$$

respectiv viteza de sedimentare v se obține din relația :

$$v = \frac{2r^2 (\rho - \rho_0)g}{9\eta} \quad (\text{III.5})$$

Din această relație se poate determina raza particulei :

$$r = \sqrt{\frac{9}{2g} \frac{v\eta}{\rho - \rho_0}} = 0,06773 \sqrt{\frac{v\eta}{\rho - \rho_0}} \quad (\text{III.6})$$

Echilibrul ~~de~~ sedimentare a permis lui J.Perrin să determine numărul lui Avogadro N_A . Atunci când un mol de gaz trece de la presiunea p_0 la p , lucrul mecanic L executat de acesta

$$L = RT \ln \frac{p_0}{p} = \frac{N_A m}{RT} gh$$

este egal cu variația energiei potențiale a gazului,

$$U = mgh,$$

Aici h este diferența (de nivel) dintre nivelul inițial (0) și nivelul final la care este adus gazul. Deoarece $M = N_A m$, unde N_A este numărul lui Avogadro se obține:

$$\ln \frac{p_0}{p} = \frac{N_A m}{RT} gh \quad (\text{III.7})$$

Aplicând formula lui Clausius pentru gaze, ceea ce implică faptul că particulele sunt suficient de mici față de distanța dintre ele, se obține:

$$\frac{p_0}{p} = \frac{n_0}{n}, \quad (\text{III.8})$$

unde n_0 și n sunt numărul de particule ~~ce se găsesc într-un cm³ la diferite înălțimi,~~

Din (III.7) și (III.8) rezultă:

$$\ln \frac{n_0}{n} = \frac{N_A mgh}{RT} \quad (\text{III.9})$$

J.Perrin a determinat cu ultramicroscopul că raportul n_0/n este 100/12.

Înlocuind în relația (III.9) valorile numerice ale constantelor, se obține:

$$\ln \frac{100}{12} = \frac{N_A \cdot 7,22 \cdot 10^{-12} \cdot 1,1 \cdot 10^{-2}}{8,31 \cdot 10^{-7} \cdot 293}$$

de unde se calculează:

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ molecule/mol}$$

III.1.2. Difuziunea

~~Este fenomenul de mișcare ale moleculelor biologice după care vom vedea în cele ce urmează.~~

Fenomenul de difuzie face ~~să~~ apară o nouă forță ce acționează asupra particulelor, datorită variației de concentrație. Presupunem acum că forțele ce acționează asupra unei particule sunt forța de difuzie și cea ~~de~~ frecare internă.

Forța care deplasează o particulă într-un mediu unde concentrația variază pe direcția x este dată de relația:

$$f = - \frac{RT}{cN_A} \frac{dc}{dx}$$

(III.10)

Forța de frecare Stokes se opune mișcării particulei ~~într-un mediu~~ într-un mediu viscos.

La echilibru, când forța de difuziune anulează forța Stokes, adică:

$$6\pi\eta rv = - \frac{RT}{cN_A} \frac{dc}{dx}$$

(III.11)

particula se mișcă fără accelerație, viteza particulei fiind o constantă la o temperatură dată, deci:

$$v_c = - \frac{RT}{6\pi\eta r N_A} \frac{dc}{dx}$$

(III.12)

Viteza(rata) de difuzie adică numărul de particule ~~din~~ ^{de} substanță transportată prin difuziune în unitatea de timp prin secțiunea ~~homogena~~ ^{transversală} este egală cu unitatea este dată de legea I-a a lui E.Fick, sub forma:

$$j = \frac{dn}{dt} = -D \frac{dc}{dx}$$

Viteza(rata) de sedimentare(numărul de particule ce sedimentează în unitatea de timp și unitatea de suprafață) este egală cu produsul dintre viteza particulei și concentrație:

$$\frac{dn}{dt} = v_c$$

(III.13)

Dar la echilibru viteza de sedimentare trebuie să fie egală cu viteza de difuzie. Identificând relațiile(III.12) și (III.13) se obține coeficientul de difuziune al substanței D:

$$D = \frac{RT}{N_A} \frac{1}{6\pi\eta r}$$

(III.14)

care este tocmai **relația lui Einstein**

Relația lui Einstein poate fi utilizată la determinarea masei moleculare a particulelor coloidale.

Notând cu V_s volumul specific, adică volumul unui gram de particule, în ipoteza că particula este sferică și are raza r , iar M este masa moleculară a particulelor coloidale, se poate scrie:

$$MV_s = N_A \frac{4}{3} \pi r^3$$

(III.15)

Scotând pe r din valoarea lui D dată de relația (III.14) și înlocuind în relația (III.15) se obține:

$$M = \frac{1}{162\pi^2 N_A^2} \left(\frac{RT}{\eta D} \right)^3 \frac{1}{V_s}$$

(III.16)

sau

$$MD^3 = K \quad (III.17)$$

unde K este o constantă la o temperatură dată și pentru aceleași particule coloidale.

Folosind o astfel de formulă s-a calculat masa moleculară a albuminei din ou obținându-se masa moleculară $M = 62.000$ (valoare mai mare decât cea determinată experimental).

În capitolul I la studiul presiunii osmotice am arătat că măsurarea acesteia servește la determinarea masei moleculare a unor molecule.

În tabelul III.1 sunt date masele moleculare ale unor substanțe determinate prin diferite metode.

Tabelul III.1

Substanța	Presiunea osmotică	Difuziune	Sedimentare
Albumină umană	14000	17000	
Gelatină	30000		
Hemoglobină			66800
Ovalbumină			34500
Invertină		54000	

III.1.3. Ultracentrifugarea

Dezvoltarea tehnicilor de ultracentrifugare face această metodă folosibilă pentru molecule cum ar fi proteinele sau chiar molecule mici. În acest caz accelerația gravitațională este înlocuită de accelerația centripetă ωx unde ω este viteza unghiulară a mașinii centrifuge iar x distanța dintre particulă și centrul de rotație.

Se numește **constantă de sedimentare** mărimea

$$s = \frac{v}{\omega^2 x} \quad (III.18)$$

și ea este caracteristică pentru o specie moleculară într-un solvent dat.

Ea se exprimă în unități Svedberg,

1 Svedberg = 10^{-13} secunde.

Din (III.18) viteza particulei este :

$$v = s \omega^2 x \quad (III.19)$$

Înlocuind (III.19) în (III.2) pentru masa particulei care se rotește, se obține :

$$m = \frac{6\pi\eta rs}{(1 - \frac{\rho_0}{\rho})} \quad (III.20)$$

Din (III.20) și din faptul că

$$M = mN_A$$

se găsește pentru masa moleculară expresia :

$$M = \frac{sRT}{D \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right)}$$

(III.21)

R fiind constanta gazului ideal.

Viteza de sedimentare a moleculelor poate fi determinată rotind suspensia (soluția) într-o centrifugă și observând mișcarea laterală.

Utilizând o metodă optică cunoscută sub denumirea de **optică Schlieren** se poate înregistra mișcarea particulelor în funcție de gradientul de concentrație.

La echilibru viteza cu care particulele se mișcă de la axa de rotație spre exterior este egală cu viteza cu care ele se mișcă în sens opus datorită gradientului de concentrație. Înlocuind pe s din (III.21) în (III.19) și apoi în (III.12), rata de sedimentare devine :

$$\frac{dn}{dt} = v c = c \frac{M \omega^2 x}{RT} D \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) \quad (III.22)$$

Identificând legea I-a a lui Fick și (III.22) se obține :

$$\frac{dc}{c} = \frac{M \omega^2}{RT} \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) x dx \quad (III.23)$$

Ecuatia (III.23) prin integrare de la x_1 la x_2 conduce la următoarea expresie pentru masa moleculară :

$$M = \frac{2RT \ln \frac{c_2}{c_1}}{\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) \omega^2 (x_2^2 - x_1^2)}$$

$$M = \frac{2RT \ln \frac{c_2}{c_1}}{\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) \omega^2 (x_2^2 - x_1^2)} \quad (III.24)$$

Această expresie pentru masa moleculară este independentă de mărimea și forma moleculelor (particulelor).

Pentru determinarea maselor moleculare metoda nu necesită o determinare independentă a coeficientului de difuzie, D .

Timpul necesar atingerii echilibrului este însă destul de lung astfel încât metoda nu este practică pentru molecule având masa moleculară mai mare de 5000.

În tabelul III.2 se dau principalele mărimi caracteristice unor macromolecule în soluții apoase.

Tabelul III.2

Substanța	$s(10^{-13}s)$	$D(m^2s^{-1} \cdot 10^{-11})$	$M(Kg/Kmol)$
Albumină serică umană	4,46	6,1	70.000
Hemoglobină(om)	4,48	6,9	63.000
Hemoglobină(cal)	4,41	6,3	68.000
Mioglobină(inimă de vacă)	2,04	11,3	16.900
Hemocianină(caracatiță)	49,3	1,65	2.800.000

III.2. Electroforeza.

Electroforeza se bazează pe studiul mișcării macromoleculelor încărcate cu sarcină electrică într-un fluid, ca urmare a aplicării unui câmp electric. Dacă macromolecula are sarcina electrică q și se află într-un câmp electric de intensitate E , asupra ei acționează o forță de natură electrică :

$$F = qE \quad (III.25)$$

Forței electrice i se opune forța de frecare Stokes $6\pi\eta rv$.

Forța electrică imprimă particulei o accelerație până ce particula atinge viteza v , constantă, care se obține la echilibrul acestor forțe:

$$qE = 6\pi\eta rv.$$

Vom defini mobilitatea macromoleculii u , raportul între viteza particulei și intensitatea câmpului electric :

$$u = \frac{v}{E} \quad (III.26)$$

Mobilitatea unei particule de sarcină $q=ze$ (e fiind sarcina elementară) și rază r va fi după (III.25) și (III.26) :

$$u = \frac{ze}{6\pi\eta r} \quad (III.27)$$

Numeroase măsurători cantitative au arătat că mobilitatea este o funcție liniară a logaritmului masei moleculare, adică :

$$u = b - a \log M \quad (III.28)$$

Aici M este masa moleculară iar a și b sunt niște constante care depind de concentrația și proprietățile substanței. (de fapt se poate face calibrarea ca să se citească direct masele moleculare).

III.3. Rezonanța electronică de spin (RES)

Tehnicile studiate mai înainte dau informații despre forma și mărimea macromoleculelor biologice. O descriere detaliată a structurii macromoleculelor implică tehnici diferite.

III.3.1. Proprietățile magnetice ale atomilor.

Configurația electronică a atomilor este de mare importanță pentru stabilirea proprietăților magnetice ale atomilor.

Atomii posedă momente cinetice și magnetice care se datoresc mișcării electronilor în jurul nucleului (mișcarea orbitală), cât și în jurul axei proprii de rotație (mișcarea de spin). Aceste momente sunt cuantificate (au valori discrete). Astfel momentul cinetic orbital al atomului cu un singur electron este definit de relația

$$L = m_0 vr \quad (III.29)$$

m_0 fiind masa particulei aflată în mișcare (electronul) cu viteza v la distanța r față de centrul de rotație. Mecanica cuantică arată că momentul cinetic orbital al atomului cu un singur electron are expresia :

$$|\vec{L}| = \hbar \sqrt{l(l+1)}$$

(III.30)

unde l este numărul cuantic orbital având valorile ~~numărul~~:

$$l = 0; 1; 2; \dots, n$$

Si proiecția momentului cinetic pe o axă privilegiată, fie axa Oz este cuantificată:

$$L_z = m\hbar$$

(III.31)

unde m este numărul cunatic magnetic, cuprins între $-l$ și $+l$.

Momentul cinetic orbital și proiecțiile acestuia pe axa Oz corespunzătoare numerelor cuantice orbitale $l=1, l=2, l=3$ sunt prezentate în Fig. III.1

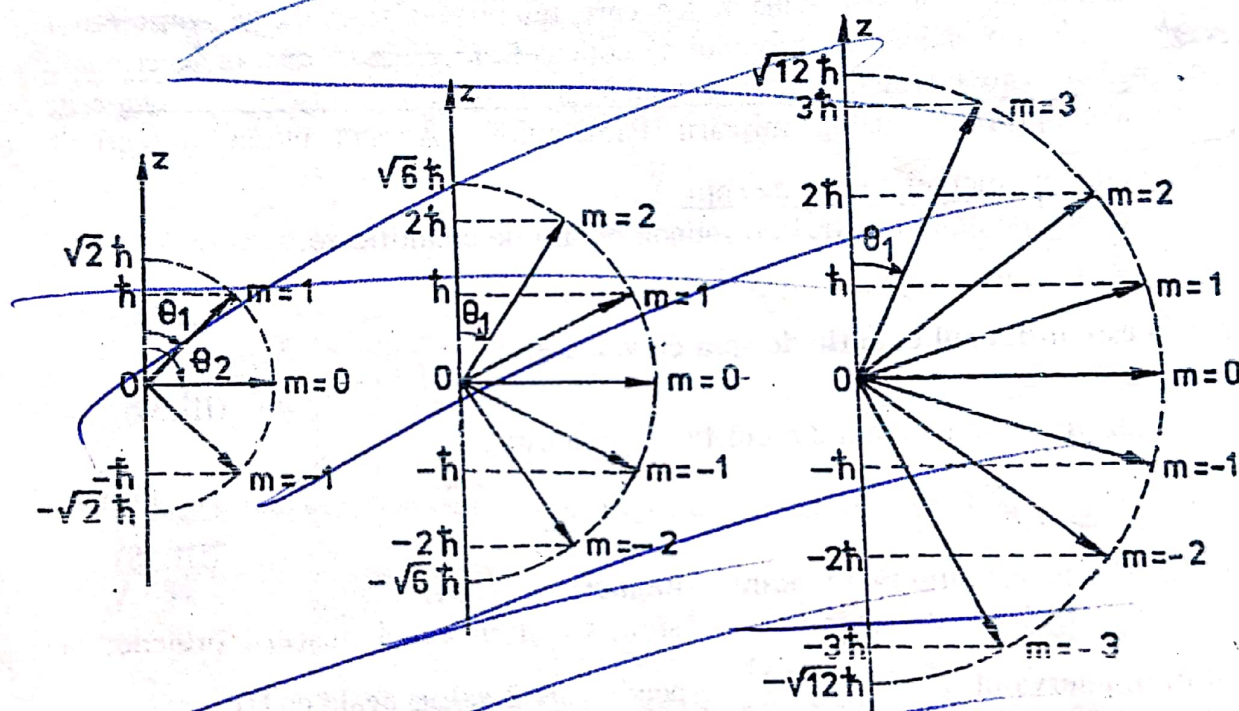


Fig. III.1

Particulele încărcate cu sarcină electrică, aflate în mișcare posedă și un moment magnetic orbital, care este de asemenea, cuantificat:

Momentul cinetic orbital al electronului, $\vec{L}$ este proporțional cu cel magnetic $\vec{\mu}$ prin relația:

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m_0} \vec{L}$$

(III.32)

Aici e este sarcina electronului.

Înseamnă că, alături de relația (III.30), este valabilă și expresia

$$\bar{\mu} = \mu_B \sqrt{l(l+1)} \quad (III.33)$$

unde mărimea :

$$\mu_B = \frac{e}{2m_0} \hbar \quad (III.34)$$

este unitatea cuantică de moment magnetic și se numește "magnetonul Bohr - Procopiu".

Raportul dintre momentul magnetic orbital și cel cinetic orbital

$$\chi = \frac{\bar{\mu}}{\bar{L}} = -\frac{e}{2m_0} \quad \text{factor giromagnetic} \quad (III.35)$$

se numește "factor (sau raport) giromagnetic"

Existența unor fenomene fizice care nu puteau fi explicate considerând doar mișcarea orbitală a electronului au condus la formularea ideii că electronul, pe lângă mișcarea orbitală, în jurul nucleului, posedă și o mișcare de rotație în jurul axei proprii (analog mișcării Pământului). Acestei ultime mișcări îi corespunde momentul cinetic de spin $\bar{S}$.

Valoarea momentului cinetic corespunde regulii de cuantificare,

$$S = \hbar \sqrt{s(s+1)} \quad (III.36)$$

Aici s este numărul cuantic de spin cu valoarea

$$s = 1/2 \quad (III.37)$$

Iar proiecția momentului cinetic de spin este :

$$S_z = m_s \hbar \quad (III.38)$$

În (III.37), m_s este numărul cuantic magnetic de spin.

Numărul cuantic magnetic de spin, ca și în cazul mișcării orbitale, ia valori în intervalul $m_s \in (-s; +s)$ respectiv cele 2 valori egale cu

$$m_s = \pm \frac{1}{2} \quad (III.39)$$

Celor două valori ale proiecției momentului cinetic de spin pe axa z ,

$S_z = \pm \frac{\hbar}{2}$, le corespund cele două sensuri de rotație pe care le poate avea electronul în jurul axei proprii (sens orar și antiorar). Această ipoteză a fost făcută de ~~Uhlenbeck și Goudsmith~~.

Momentul cinetic de spin, după (III.36) și (III.37) are atunci valoarea :

$$S = \hbar \sqrt{\frac{3}{4}} \quad (III.40)$$

Ca urmare electronul posedă un moment cinetic orbital $\vec{L}$ și un moment cinetic propriu (de spin) $\vec{S}$. Aceștia se compun dind momentul cinetic total $\vec{J}$.

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \quad (\text{III.41})$$

Componenta după axa z a momentului cinetic total este :

$$J_z = L_z \pm \frac{\hbar}{2} \quad (\text{III.42})$$

Pentru cazul când electronul se găsește în starea fundamentală ($n=1; l=0$) momentul cinetic orbital se anulează; momentul cinetic de spin însă este diferit de zero. Dacă momentul cinetic de spin nu poate fi zero atunci mișcarea de spin nu poate fi niciodată anulată.

Deci spre deosebire de **momentul cinetic orbital** care este legat de spațialitate, **momentul cinetic de spin** este o **mărime intrinsecă**, așa cum sunt masa și sarcina.

Corespunzător mișcării de spin, atomul cu un electron posedă și un moment magnetic de spin care are valoarea :

$$\vec{\mu}_S = -\frac{e}{m_0} \vec{S} \quad (\text{III.43})$$

a cărei mărime este

$$\mu_S = -\frac{e\hbar}{m_0} \sqrt{s(s+1)} = -2\mu_B \sqrt{s(s+1)} \quad (\text{III.44})$$

Proiecția momentului magnetic de spin pe axa z se poate scrie :

$$\mu_{S_z} = -m_s \frac{e\hbar}{m_0} = -2m_s \mu_B = \mp \mu_B \quad (\text{III.45})$$

III.3.2. Rezonanța paramagnetică electronică sau rezonanța electronică de spin. (RES)

Formarea moleculelor și cristalelor este însoțită de o compensare a momentelor cinetice și magnetice orbitale și de spin ale electronilor. Dacă însă se consideră un gaz de atomi de sodiu, o astfel de anulare nu mai are loc și substanța este paramagnetică (dacă sunt introduse într-un câmp magnetic, momentele magnetice ale atomilor interacționează cu acesta și se orientează după câmpului exterior). De asemenea un radical liber reprezintă o specie moleculară cu proprietăți paramagnetice deoarece conține cel puțin un electron cu spin necompensat. De aceea radicalii liberi au momente magnetice proprii.

Ei au un rol fundamental în reacții de oxido-reducere, polimerizare ca și în procese metabolice cum sunt fosforilarea oxidativă sau fotofosforilarea. Pentru

substanțe care nu au paramagnetism intrinsec, Mc Connell a propus introducerea, în aceste sisteme, de radicali liberi stabili. Dacă o asemenea substanță este introdusă într-un câmp magnetic de inducție B , momentul magnetic de spin al electronilor celibatari se orientează astfel încât să fie cuantificabilă proiecția acestuia pe direcția câmpului. Dacă inducția B este orientată după axa OZ , atunci momentul magnetic de spin μ_s se orientează sub un unghi α astfel încât

$$\mu_{sz} = \pm \mu_B \quad (\text{III.46})$$

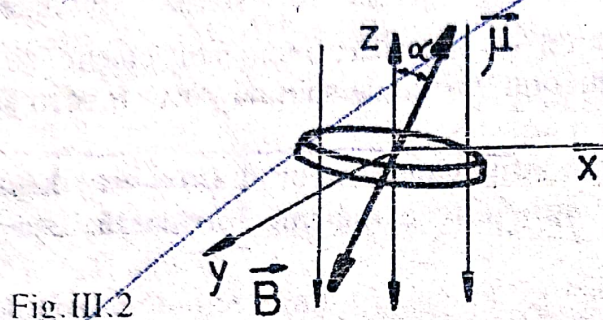


Fig. III.2

Unghiul dintre $\vec{\mu}_s$ și $\vec{B}$ este dat de :

$$\cos \alpha = \frac{\mu_{sz}}{\mu_s} = \frac{\pm \mu_B}{2\mu_B \sqrt{s(s+1)}} = \pm \frac{\sqrt{3}}{3} \quad \text{adică } \alpha \cong \pm 54^\circ \quad (\text{III.47})$$

Celor două valori ale unghiului, îi corespund două orientări., una paralelă cu câmpul ($\alpha = +54^\circ$) căreia îi corespunde energia de interacțiune :

$$W_{\uparrow\uparrow} = -\vec{\mu}_s \cdot \vec{B} = -\mu_B B \quad (\text{III.48})$$

și cealaltă antiparalelă ($\alpha = -54^\circ$) căreia îi corespunde o energie mai mare :

$$W_{\uparrow\downarrow} = -\vec{\mu}_s \cdot \vec{B} = \mu_B B \quad (\text{III.49})$$

X Dacă asupra substanței paramagnetice se aplică un câmp de microunde, o parte din sistemele ce se găsesc pe nivelul de energie inferior vor trece pe cel superior, absorbind energie de la câmpul de microunde. Energia absorbită de la câmpul de microunde este

$$h\nu = W_{\uparrow\uparrow} - W_{\uparrow\downarrow} = 2\mu_B B \quad (\text{III.50})$$

iar frecvența cuantei absorbite

$$\nu = \frac{2\mu_B}{h} = \frac{eB}{2\pi m_0} \quad (\text{III.51})$$

este egală cu frecvența cu care se face precesia electronilor în câmp magnetic și se numește **precesie Larmor**.

În afara absorbției poate avea loc și un fenomen de emisie stimulată. Dar numărul electronilor ce se găsesc în starea de energie superioară este mai mic decât numărul de electroni din nivelul inferior și anume, după legea de distribuție Boltzman:

$$n_2 = n_1 e^{-\frac{\Delta W}{kT}} = n_1 e^{-\frac{2\mu_B B}{kT}}$$

reprezentând populația de pe nivelul inferior, n_2 de pe cel superior.

De aceea se poate considera că predomină un fenomen de absorbție a energiei de la câmpul de microunde. Atunci când frecvența oscilatorului de microunde este egală cu frecvența de precesie a electronului se obține rezonanța.

Acest fenomen se numește **rezonanță paramagnetică electronică sau rezonanță electronică de spin (RES)**.

Instalația cu care se realizează fenomenul RES este compusă din proba de substanță paramagnetică plasată într-un câmp magnetic creat de bobina B alimentată cu un curent de intensitate variabilă. În același timp, proba se găsește într-un câmp electromagnetic produs de un generator de microunde cu frecvența de aproximativ 30GHz. (Fig. III.3)

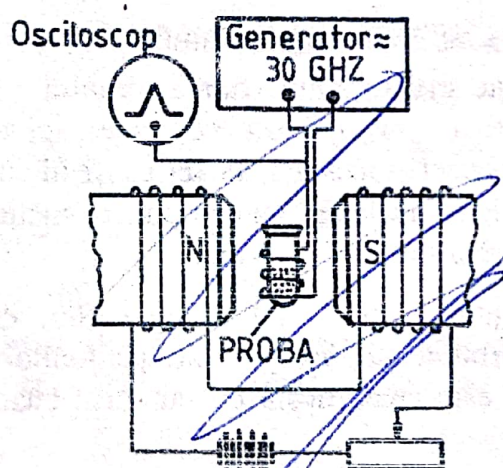


Fig. III.3

Se variază intensitatea curentului prin bobină (deci câmpul magnetic creat) până se observă rezonanța la osciloscop.

În conformitate cu formula (III.51) frecvența Larmor ar trebui să fie aceeași pentru toate substanțele paramagnetice, B fiind inducția câmpului magnetic exterior. În realitate însă, electronul se află într-un câmp magnetic efectiv rezultat din suprapunerea câmpului exterior cu câmpul propriu ce depinde de structura substanței studiate. De aceea analiza RES permite studiul unor proprietăți ale substanțelor paramagnetice.

Intensitatea liniei de absorbție dă informații despre numărul de electroni neîmperecheați din proba studiată, iar lărgimea liniei depinde de mărimea și forma interacțiunilor ce au loc în substanța studiată.

Substanțele biologice pot fi studiate prin metoda RES doar atunci când conțin radicali liberi cu spin necompensat. Metoda RES folosită, numită metoda markerilor de spin este una din cele mai sensibile tehnici de investigație ce permite obținerea de informații privind structura și dinamica macromoleculelor. Dintre domeniile în care se aplică amintim studiul biopolimerilor care a permis elucidarea unor aspecte privind activitatea catalitică a enzimelor, simetria moleculelor proteice, calculul distanței dintre diferitele grupări chimice etc. Prin utilizarea markerilor de spin au putut fi elucidate aspecte legate de fluiditatea membranelor naturale, de mobilitatea proteinelor și lipidelor acestora. În domeniul medical metoda se aplică pentru studiul cantitativ al substanțelor chimice prezente în lichidele biologice. Metoda RES a permis de asemenea studiul structurii hemoglobinei sau a clorofilei. De asemenea prin metoda RES s-a stabilit că acizii nucleici au proprietăți semiconductoare.

III.4. Rezonanța magnetică nucleară

III.4.1. Proprietăți magnetice ale nucleului.

Studiul structurii fine a dubletului galben al sodiului a arătat că cele două

linii, caracterizate de $\lambda_1 = 5890 \text{ \AA}$ și $\lambda_2 = 5896 \text{ \AA}$ sunt alcătuite fiecare din două linii foarte apropiate, fapt care definește structura hiperfină a sodiului

Pentru a explica structura hiperfină, Pauli a emis ipoteza existenței spinului nuclear și a momentului magnetic nuclear, asociat acestuia, la fel ca și în cazul atomului. Interacțiunea momentului magnetic al nucleului cu câmpul magnetic al electronilor produce o despicare suplimentară a liniilor spectrale.

Spinul nuclear $\vec{I}$ reprezintă momentul cinetic total al nucleului, care provine din suma momentelor cinetice orbitale și de spin ale protonilor și neutronilor (nucleonilor). Mărimea acestuia este cuantificată cu numărul cuantic de spin nuclear i prin relația

$$|\vec{I}| = \hbar \sqrt{i(i+1)} \quad (\text{III.52})$$

unde $i = 0, 1/2, 1, 3/2, \dots$

Valorile maxime ale numărului cuantic de spin, găsit experimental, sunt $7/2$, pentru valorile semiîntregi și 9 , pentru valorile întregi. Aceste limite sugerează aranjarea în pături a nucleonilor din nucleu, până la completarea unor aranjamente stabile corespunzătoare unor minime ale energiei nucleului la fel ca și în cazul completării păturilor electronice în atom.

Orientările momentelor cinetice nucleare sunt și ele cuantificate, prin proiecțiile acestora pe o direcție privilegiată prin relația

$$I_z = m_i \hbar \quad (\text{III.53})$$

unde $m_i = -i, -i+1, -i+2, \dots, i-2, i-1, i,$

Momentelor cinetice ale nucleelor (care sunt sisteme cu sarcină electrică nenulă) le corespund momente magnetice.

Magnetonul nuclear este definit printr-o relație asemănătoare cu cea a magnetonului Bohr

$$\mu_N = \frac{eh}{2m_p} \approx 5.10^{-27} \text{ Am}^2$$

$$\mu_N = \frac{eh}{2m_p} \approx 5.10^{-27} \text{ Am}^2$$

unde m_p este masa protonului.

Factorul giromagnetic nuclear este dat de raportul dintre momentul magnetic și cel cinetic

$$\gamma = \frac{\mu}{I} = \frac{ge}{2m_N}$$

În cazul protonului, pentru care $i=1/2$, proiecția momentului magnetic de spin pe direcția privilegiată Oz este

$$\mu_{z,p} = m_s g \mu_N = 2,79 \mu_N \quad (\text{III.54})$$

Pentru neutron, deși neutru electric, determinările experimentale indică

$$\mu_{z,n} = -1,94 \mu_N \quad (\text{III.55})$$

Să considerăm un nucleu care posedă un moment magnetic $\vec{\mu}$ și un moment cinetic $\vec{I}$. Cele două mărimi sunt paralele și putem scrie

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{I} \quad (\text{III.56})$$

Într-un câmp magnetic exterior $\vec{B}_0$ nucleul are o energie suplimentară

$$W = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}_0 = -\gamma \vec{I} \cdot \vec{B}_0$$

$$\text{unde } I_z = m_i \hbar$$

m_i fiind numărul cuantic magnetic de spin nuclear,

Energia căpătată de nucleu în câmpul magnetic exterior va fi:

$$W = -m_i \hbar \gamma B_0 \quad B_0 - \text{câmp magnetic exterior} \quad (\text{III.57})$$

Într-un câmp magnetic, un nucleu cu $i=1/2$ are două nivele de energie corespunzătoare, cu $m_i = \pm 1/2$

Nucleul poate trece dintr-o stare energetică în cealaltă schimbând cu exteriorul o cantă

$$\hbar \omega_0 = \Delta W = \hbar \gamma B_0$$

de unde se obține imediat

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (\text{III.58})$$

Aceasta este condiția fundamentală pentru absorbtia de rezonanță magnetică nucleară. Dacă nucleul are $i > 1/2$, relația (III.58) rămâne neschimbată deoarece, deși în câmp magnetic apar mai multe nivele energetice posibile, funcționează regula de selecție

$$\Delta m_i = \pm 1 \quad (\text{III.59})$$

Absorbția rezonantă este o caracteristică a oscilatorilor amortizați.

În RMN spinii nucleari efectuează precesii în jurul câmpului magnetic; momentele magnetice în mișcare de precesie dau o componentă constantă pe direcția câmpului magnetic exterior și componente alternative pe direcții perpendiculare. În experiențe de RMN peste câmpul static $\vec{B}_0(0,0,B_0)$ se aplică un câmp de radio frecvență perpendicular pe $\vec{B}_0$ ca în figura III.4 (în direcția Oy).

G și M din figura indică generatorul de radio frecvență și circuitul pentru măsurarea absorbției de energie de către probă.

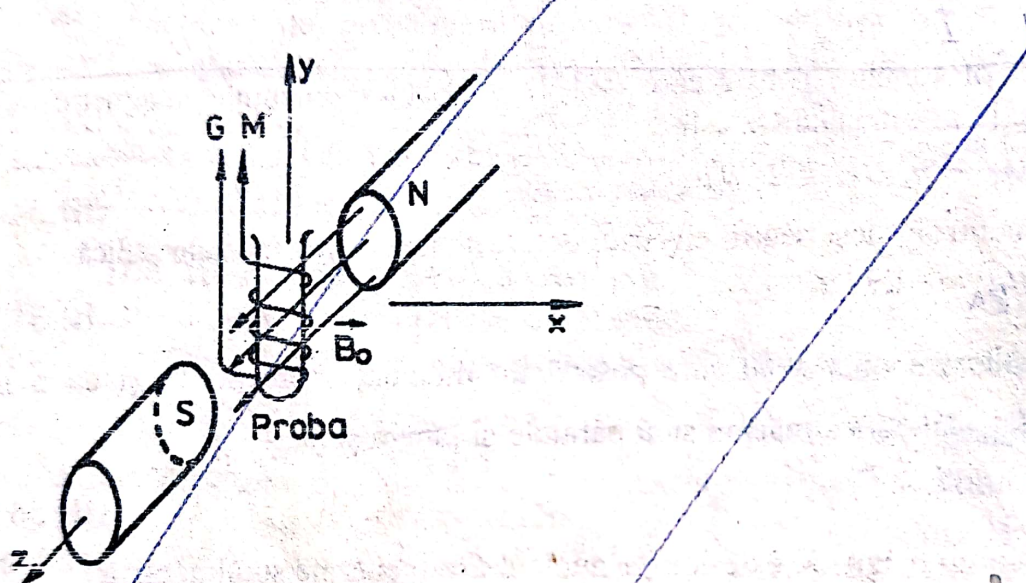


Fig. III.4

O curbă tipică (de absorbție rezonantă a protonilor din apă) pentru experimente de RMN este indicată în figura

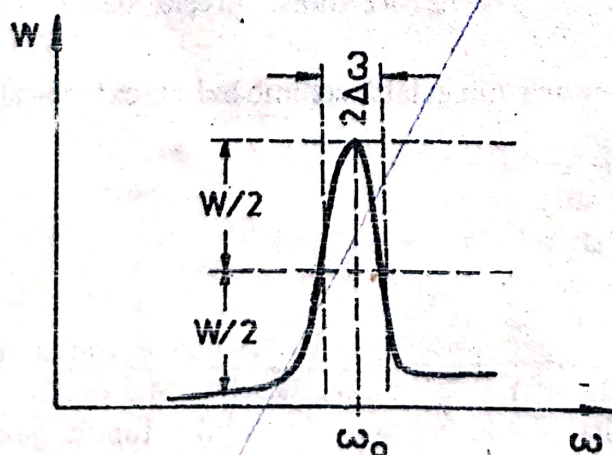


Fig. III.5

Valoarea frecvenței de rezonanță și a semilărgimii de rezonanță oferă indicații foarte precise asupra factorului giromagnetic și a câmpului local, ceea ce permite estimări asupra structurii moleculelor organice complexe.

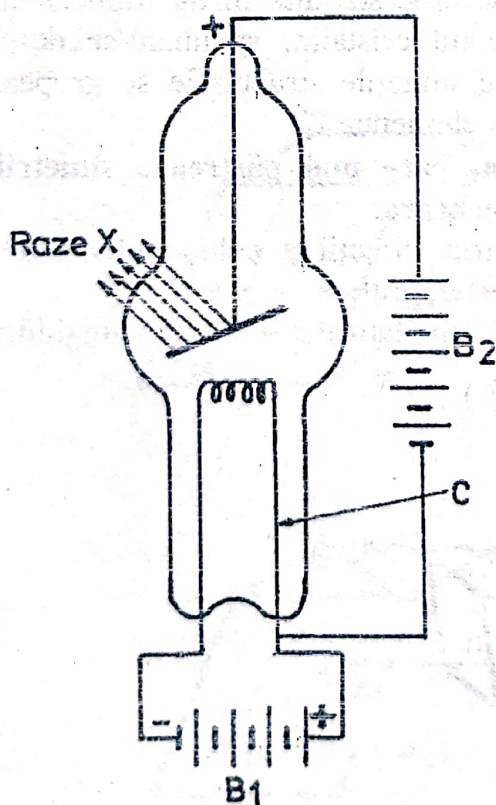
În acest ultim caz spectrul de absorbție RMN nu prezintă o singură linie, ca în figura ci mai multe, cu amplitudini și semilărgimi diferite. Semilărgimea unei linii depinde de distanța până la vecinii cei mai apropiați și indică lungimea legăturii cu vecinii, iar poziția liniei dă tăria interacțiunii. Aceste mărimi permit determinarea cu mare exactitate a formulei structurale a substanței analizate dacă formula brută (compoziția procentuală este cunoscută).

Dacă protonii unei anumite grupări dintr-o moleculă sunt înlocuiți cu deuteroni, se pot studia prin RMN comportaările grupării respective (în acest fel se pot obține acizi grași complet deuterați). Diferențele între datele obținute prin metoda RES și RMN (în cazul acizilor grași) arată că atașarea markerilor de spin reprezintă o perturbare mai mare a moleculei decât în cazul înlocuirii protonului cu deuteriul, în cazul RMN-ului. Ca urmare informațiile obținute prin metoda RMN sunt mult mai apropiate de realitate de cât cele date de RES.

Combinarea celor două metode, RES și RMN a condus la apariția tehnicii de dublă rezonanță electronică-nucleară (ENDOR-Electron Nuclear Double Resonance). Tehnica ENDOR permite obținerea unor informații suplimentare privind studiul radicalilor liberi organici.

III.5. Studiul substanțelor solide cu metoda de difracție cu raze X

III.5.1. Spectrele de raze X.



Spectrele de raze X iau naștere prin bombardarea unui element solid sau a unei combinații solide (anticatod) cu electroni accelerați într-un tub de descărcări electrice. (Fig. III.6)

Electronii din tuburile de raze X accelerați la tensiuni mari (peste 10 KV) posedă o energie suficient de mare pentru a pătrunde până în straturile, adânci ale atomilor, din care expulzează un electron. Nivelul vacant astfel creat este imediat ocupat de un electron de pe un nivel de energie superior, care trece într-o stare energetică mai stabilă.

Totodată se emite o cantă X. Dacă de exemplu a fost expulzat un electron din stratul K, locul vacant se poate ocupa cu electroni din straturile L, M, N, O sau P și iau naștere toate liniile stratului K.

Fig. III.6

Analiza spectrelor de raze X a arătat că frecvențele limitelor de serie, notate cu $\nu_k; \nu_l; \nu_m$ variază în raporturile următoare :

$$\nu_k : \nu_l : \nu_m \dots = \frac{1}{1^2} : \frac{1}{2^2} : \frac{1}{3^2}$$

În același raport variază și energiile

$$h\nu_k, h\nu_l, h\nu_m$$

necesare pentru a elimina un electron din straturile respective.

✱ Liniiile spectrelor de raze X corespund ecuației

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) (Z - z)^2$$

în care R este constanta lui Rydberg, Z este numărul atomic al elementului considerat, iar z (numită constantă de ecranare) indică numărul de electroni situați între nucleu și nivelul de energie al electronului expulzat.

Pe baza datelor experimentale expuse anterior, bazate în special pe observarea spectrelor atomice, au fost elaborate o serie de teorii privind aiv structura atomilor precum și proprietățile radiațiilor X.

Radiațiile X se folosesc frecvent pentru studiul substanțelor solide cristaline.

~~Alte utilizări ale radiațiilor X vor fi prezentate mai târziu.~~

III.5.2. Rețele cristaline.

Starea cristalină rezultă din aranjarea ordonată a unităților structurale (atomi, molecule, ioni) într-o ordine bine stabilită în trei dimensiuni. Această ordonare se realizează în tot domeniul cristalin, spunându-se despre cristal că are simetrie extinsă. Într-un cristal unitățile structurale se grupează într-o celulă poliedrică de bază, numită "celula elementară".

Deci cel mai mic element de volum, care mai păstrează simetriile cristalului din care provine, este celula elementară.

Cristalul se obține prin repetarea în cele trei direcții a celei elementare. Muchiile celei elementare se numesc axe cristalografice.

Celula elementară este definită în mod unic prin laturile a, b, c și unghiurile α, β, γ care sunt constantele rețelei (Fig. III.7)

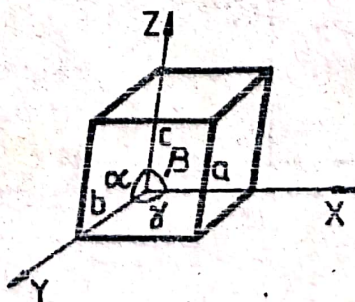


Fig. III.7

Celula elementară cu numărul cel mai mic de atomi ce caracterizează substanța chimică, ce sunt plasați în vîrfurile sale se numește celulă primitivă(P). Prin adăugarea unor atomi complementari în centrul bazelor sau fețelor,centrați în volum, pe lîngă celula primitivă mai apar alte tipuri de celule elementare : cu fețe centrate(F), cu volum centrat (I) și celule elementare cu baze centrate(C).

După forma paralelipipedului care constituie celula elementară cristalele se împart în 7 sisteme cristalografice denumite singonii. Ansamblul tuturor elementelor de simetrie ale unei rețele cristaline reale formează un grup spațial. Sunt posibile 230 grupuri spațiale, grupate în 32 grupuri punctuale, 14 tipuri de rețele diferite și 7 singonii cristaline (sau rețele Bravais). În Fig.III.8 sunt indicate structurile simbolizate prin P, C, I și F în tabelul III.3 precum și notațiile $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$. Acestea sunt rezumate în tabelul III.3

Tabelul III.3

Singonia	Nr.rețele	Simbol	Restricții la axe și unghiuri
Triclinic	1	P	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma$
Monoclinic	2	P, C	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta = \gamma = 90^\circ$
Ortorombic	4	P, C, I, F	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal	2	P, I	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Cubic	3	P, I, F	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Trigonal	1		$a = b = c, 90^\circ \neq \alpha = \beta = \gamma < 120^\circ$
Hexagonal	1	P	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90, \gamma = 120^\circ$

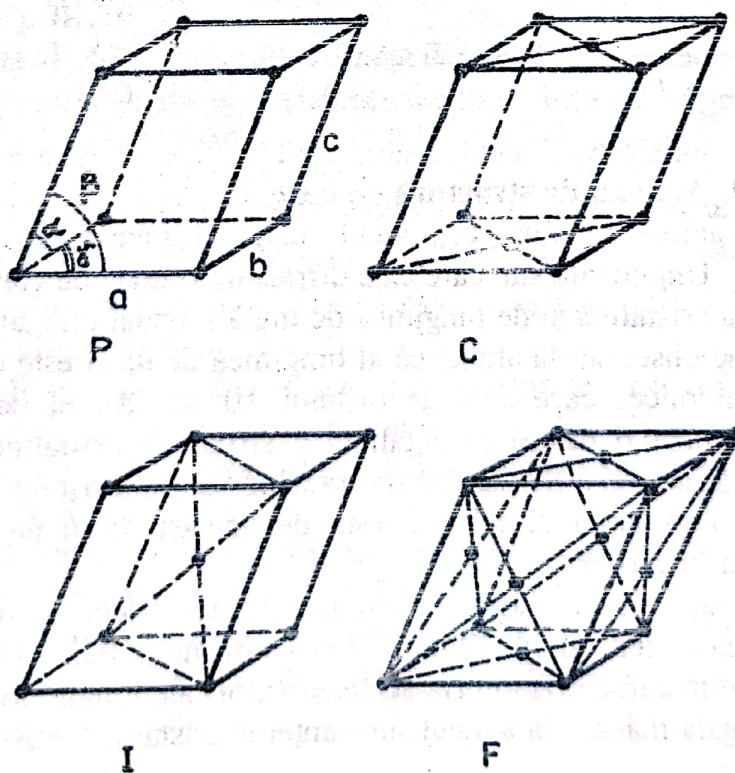


Fig.III.8

Datorită anizotropiei cristalului este necesar să se introducă un sistem de notații ale planurilor dintr-un cristal atunci când se fac studii cristalografice. Fie un cristal a cărui celulă elementară este dată în figura III.9. Trei puncte necoliniare de pe axe cristalografice x_0, y_0, z_0 determină un plan cristalografic. În analiza structurală planurile se definesc cu ajutorul unor mărimi numite indici Miller ai planului respectiv. Aceștia se stabilesc în modul următor: se face raportul $a/x_0, b/y_0, c/z_0$ și se iau inversul acestor numere. În figura III.9 indicii Miller sunt (1,1,2).

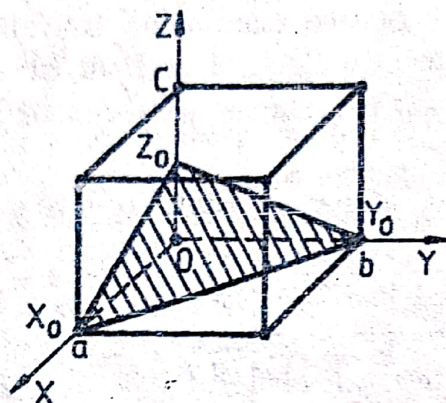


Fig.III.9

Planele dintr-un cristal sunt notate prin simbolii Miller (h, k, l) .

Orice plan paralel cu planul considerat este caracterizat de aceeași indici Miller, deci indicii Miller descriu o familie de plane.

Distanța dintre două plane alăturate în cazul singoniei cubice este:

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (\text{III.60})$$

III.5.3. Analiza de structură cu raze X

Structura cristalină a unui corp solid poate fi investigată cu ajutorul difracției unei unde. Unghiurile sub care este difractată o undă de către un cristal depinde de structura cristalină și de lungimea de undă a unde utilizate. Imaginea de difracție este bine observabilă atunci când lungimea de undă este comparabilă cu distanțele interatomice, care sunt de ordinul 10^{-10}m . Astfel de unde sunt tocmai radiațiile X deci o descriere detaliată a structurii cristaline implică o analiză de structură cu raze X. Difracția razelor X pe cristale apare când lungimea de undă a radiației X folosite este de același ordin de mărime cu distanța dintre atomi în cristal.

Facem observația că și undele de Broglie asociate electronilor accelerați într-o diferență de potențial de 30 - 200 V (sau neutronilor termici emiși de un reactor de fisiune) sunt caracterizați prin aceleași valori ale lungimilor de undă și sunt utilizabile în egală măsură la studiul substanțelor cristaline. Metodele bazate

pe difracția neutronilor sunt deosebit de valoroase în cercetarea structurii cristalelor magnetice. Difracția electronilor este utilă pentru straturi cristaline foarte subțiri și pentru gaze, deoarece electronii, fiind încărcati electric, pătrund în substanțe pe distanțe relativ scurte.

Radiația X incidentă pe un cristal este împrăștiată în toate direcțiile de atomii din nodurile rețelei. Totul se petrece ca și cum unda ar fi "reflectată" pe straturile atomice succesive. Se obțin maxime de difracție, dacă reflexiile pe straturi succesive interferă constructiv. Din Fig.III.10 rezultă că diferența de drum pentru undele refractate pe plane adiacente este :

$$\delta = 2d_{hkl} \sin \theta$$

Se obține maxime de interferență dacă :

$$\delta = 2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (\text{III.61})$$

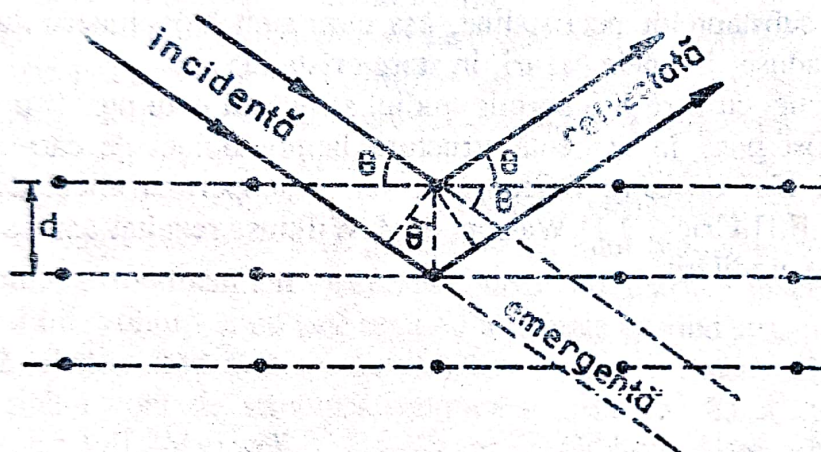


Fig.III.10

În relația(III.61) d_{hkl} este distanța dintre planele cristalografice

Această relație este cunoscută sub numele de "legea lui Bragg". Legea lui Bragg cere ca λ și θ să fie corelate. Undele cu o anumită valoare a lungimii de undă, care pătrund într-o structură cristalină sub un unghi θ arbitrar nu sunt împrăștiate constructiv decât dacă relația (III.61) este îndeplinită. Pentru a obține maxime de difracție, este deci necesar să se varieze fie λ , fie θ , astfel încât să fie îndeplinită legea lui Bragg.

Metoda de studiu a structurii cristaline prin difracție cu raze X a fost descoperită de fizicianul Max von Laue și dezvoltată apoi de fizicienii William Bragg și Lawrence Bragg(tată și fiu). Din acest motiv expresia (III.61) poartă numele de legea lui Bragg..

Difracția cu raze X se face pe următoarele căi :

a) Metoda cristalului fix. În acest caz se utilizează radiații X monochromatice(deci lungimea de undă variază). Metoda de difracție este cunoscută ca metoda Laue. Pentru că lungimea de undă nu este cunoscută, metoda este limitată.

b) Metoda cristalului rotitor folosește un fascicul de radiații X monocromatice și un monocristal care se rotește, deci unghiul θ din relația lui Bragg este variabil. Această tehnică este folosită pentru măsurători structurale de precizie. Intensitatea spotului conține informații importante despre structura fină a cristalului.

c) Metoda pulberilor cristaline (Debye-Scherrer) În această metodă se folosesc radiații X monocromatice (de exemplu se selectează linia K_{α} a Cu) care cad pe o probă sub formă de pulbere fină. Proba se fixează pe axa unei camere cilindrice care este prevăzută în partea interioară cu un film fotografic. Conurile de difracție intersectează filmul într-o serie de cercuri concentrice care formează debyeograma.

Metoda pulberilor cristaline dă informații despre distanța dintre planele cristalografice.

Începînd din anul 1958 analiza de structură cu raze X a început să fie folosită și în cazul substanțelor necristaline, așa cum sunt biopolimerii, după ce în prealabil au fost aduse, în unele cazuri, în stare cristalină.

Metoda difracției cu raze X a permis studiul structurii unui număr mare de proteine. Astfel a fost pusă în evidență structura hemoglobinei de către M.F. Perutz, a vitaminei B_{12} , de către D. Hodgkin, sau descoperirea elicei duble a AND-ului de către F.H. Crick, J.D. Watson și M. Wilkins, rezultat care a putut explica mecanismele eredității.

CAPITOLUL IV. TERMODINAMICA BIOLOGICA

IV.1 Sisteme termodinamice

Termodinamica biologică se ocupă cu studiul proprietatilor fizice ale sistemelor biologice din punct de vedere al schimburilor de caldură și al conversiei energiei. Sistemele biologice constau dintr-un număr mare de componente (atomi si molecule) aflate in interacțiune dar pot fi considerate macroscopice deoarece sunt mult mai mari decât dimensiunile particulelor componente. Studiul sistemelor se face mai ușor la echilibru, adică in starea în care sistemul nu mai suferă schimbări macroscopice observabile.

Există două metode de studiu a sistemelor termodinamice :

1. Termodinamica clasică dezvoltată de Carnot, Clausius, Kelvin, Joule, Meyer care se bazează pe principiile termodinamicii (care sunt legi fenomenologice rezultate prin generalizarea unui număr mare de experimente). Principiile termodinamicii operează numai cu mărimi macroscopice (presiune, temperatură, volum) și nu țin cont de aspectele privind structura microscopică.

2. Fizica statistică în care legile care descriu sistemele macroscopice se deduc ținând cont de structura atomică a acestora. Ea a apărut ca urmare a lucrărilor lui Maxwell, Boltzmann, Gibbs. Sistemele termodinamice macroscopice conțin un număr foarte mare de particule (atomi si molecule), acest număr fiind de ordinul numărului lui Avogadro, $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ particule pe mol. De aceea un sistem de acest fel nu poate fi tratat ca și un sistem mecanic, ci sunt necesare legi statistice. În cele ce urmează vom aborda sistemele biologice în cadrul termodinamicii clasice, dar acolo unde explicațiile nu se vor putea face în cadrul acestei abordări, vom apela la fizica statistică.

Din punct de vedere al interacțiunii cu mediul înconjurător, sistemele termodinamice se clasifică astfel :

1) **sisteme izolate** sunt acele sisteme care nu schimbă nici energie nici substanța cu mediul exterior

2) **sisteme închise** sunt acele sisteme care nu schimbă substanța dar schimbă energie cu mediul exterior

3) **sisteme deschise** sunt acele sisteme care schimbă atât energie cât și substanța cu mediul exterior

Sistemele biologice sunt sisteme deschise

Mărimile macroscopice care caracterizează un sistem termodinamic și raportul acestuia cu mediul înconjurător se numesc parametri macroscopici. Totalitatea parametrilor independenți care determină starea sistemului se numesc **parametri de stare**. Parametrii care determină complet starea sistemului la

momentul considerat și nu depinde de istoria anterioară a sistemului se numesc funcții de stare. Starea unui sistem termodinamic constituit dintr-un fluid se determină complet cu ajutorul masei m , a volumului V și a presiunii p , prin ecuația de stare. Pentru gazele ideale această ecuație de stare este legea gazului ideal :

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad \begin{array}{l} M - \text{masa molic. a gazului} \\ T - \text{temp. absolută} \end{array} \quad (\text{IV.1})$$

În (IV.1) M este masa moleculară a gazului iar T este temperatura sa absolută. Dacă și în mecanica apar noțiuni ca masa, presiunea (după cum am văzut în capitolul I), specific pentru termodinamică este temperatura.

➤ Pentru ca două sisteme să se afle în echilibru termic este necesar și suficient ca temperaturile lor să fie egale.

IV.2. Principiile termodinamicii

IV.2.1 Principiul 0 al termodinamicii

Principiul 0 al termodinamicii afirmă că, dacă sistemul A este în echilibru cu sistemul B iar B este în echilibru termic cu sistemul C atunci sistemul A este în echilibru cu sistemul C.

Principiul 0 al termodinamicii stă la baza măsurării temperaturii comparându-se temperatura corpului a cărui temperatură vrem să o determinăm cu un etalon, care este termometrul. Pentru a măsura temperatura se folosesc diferite fenomene, deci există diferite tipuri de termometre. La baza funcționării acestor termometre stau variația presiunii, volumului, rezistenței unui conductor sau semiconductor cu temperatura etc.

Există două scări de temperatura folosite la noi în țară: scara Celsius și scara temperaturilor absolute. Scara de temperatură este complet definită dacă se fixează un anumit punct ca reper. Acest punct se alege punctul triplu al apei (adică temperatura la care coexistă cele trei faze: gazoasă, lichidă și solidă), care are valoarea $T_{\text{triplu}} = 273,15\text{K}$.

IV.2.2. Principiul I al termodinamicii

Principiul I al termodinamicii constituie o extindere a legii conservării energiei la procesele în care intervine mișcarea termică a materiei, adică mișcarea dezordonată a atomilor și moleculelor. Pentru a formula acest principiu vom prezenta mai întâi câteva noțiuni fundamentale din termodinamică.

Energia internă a unui sistem se compune din energia cinetică a moleculelor aflate într-o continuă mișcare dezordonată. Într-un gaz ideal energia internă este suma energiilor de translație, de rotație și de vibrație a moleculelor. Energia internă este o funcție de stare și are expresia :

$$U = \sum_{i=1}^N E_{ci} \quad (\text{IV.2})$$

unde E_{ci} este energia cinetică a particulei "i".

Energiile de translație, de rotație și de vibrație a moleculelor depind de numărul de grade de libertate (numărul variabilelor independente ce

caracterizează starea sistemului). Astfel o moleculă monoatomică are 3 grade de libertate, una biatomică are 5 grade de libertate (3 de translație și 2 de rotație deoarece mișcarea în jurul axei proprii nu schimbă configurația în spațiu) iar moleculele triatomice și poliatomice au 6 grade de libertate.

• În medie statistică, fiecărui grad de libertate a unei molecule îi corespunde o energie cinetică și deci o energie termică egală cu :

$$\varepsilon = \frac{1}{2} kT \quad (\text{IV.3})$$

k fiind constanta lui Boltzmann.

Pentru o moleculă cu " i " grade de libertate, energia cinetică medie are valoarea "

$$E_c = \frac{i}{2} kT$$

Energia internă a unui mol de gaz va fi atunci :

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{i}{2} kT = \frac{i}{2} N_A kT = \frac{i}{2} RT \quad (\text{IV.4})$$

R fiind constanta gazului ideal ($R = 8310 \text{ J/K}$)

Din (IV.4) se observă că energia internă a gazului ideal nu depinde decât de temperatură și nu și de volum.

Organismele vii sunt sisteme a căror energie internă poate crește sau poate să scadă în funcție de diferite condiții (vârstă, stare fiziologică, etc.)

Lucrul mecanic este o mărime ce depinde de procesul termodinamic (transformarea pe care o suferă sistemul respectiv) și nu o funcție de stare așa cum este energia internă.

Pentru a defini lucrul mecanic, să considerăm un gaz închis într-un cilindru cu ajutorul unui piston mobil de arie S. Gazul exercită o presiune asupra pistonului și îl împinge astfel că acesta se deplasează din poziția 1 în poziția 2 ca în Fig. IV.1

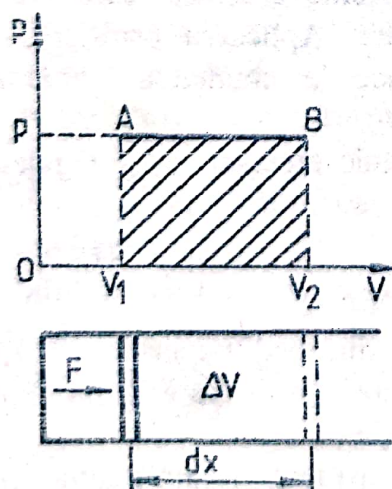


Fig. IV.1

Lucrul mecanic elementar este după definiție :

$$\delta L = F dr \quad (IV.5)$$

Dar cum forța care acționează asupra pistonului este $F = pS$ rezultă că :

$$\delta L = F dr = p dV \quad (IV.6)$$

Principiul I al termodinamicii a fost formulat prima dată de către medicul german R. Mayer și acesta afirmă că :

a) Dacă sistemul se considera izolat adiabatic (adică nu se face schimb de căldură cu mediul înconjurător), $\delta Q = 0$ și :

$$\delta L = dU \quad (IV.7)$$

b) Dacă sistemul nu este izolat adiabatic, pentru procese infinitezimale principiul I al termodinamicii se scrie :

$$\delta Q = dU + \delta L \quad (IV.8)$$

Dacă se înlocuiește expresia lucrului mecanic din formula (IV.6), atunci pentru principiul I al termodinamicii se obține următoarea formă :

$$\delta Q = dU + p dV \quad (IV.9)$$

care este forma cea mai generală a acestui principiu.

Sub forma globală principiul I al termodinamicii se poate scrie :

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta L \quad (IV.10)$$

Din expresia (IV.8) sau (IV.9) pentru principiul I al termodinamicii rezultă o concluzie asupra funcționării mașinilor termice. Dacă într-o mașină termică substanța de lucru efectuează un ciclu de transformări după care revine în poziția inițială, deci $\Delta U = U_f - U_i = 0$ și $\Delta Q = \Delta L$, și ca urmare se poate obține lucru mecanic numai pe baza schimbului de căldură cu exteriorul.

Deci este imposibilă construcția unui perpetuum mobile de speța I-a, adică a unei mașini care să producă lucru mecanic fără a primi energie.

Aceasta este de fapt o altă formulare a principiului I al termodinamicii

IV.2.3. Principiul I al termodinamicii pentru sistemele biologice

În cazul sistemelor biologice, care sunt sisteme deschise, care schimbă energie cu mediul exterior, lucrurile se schimbă. Aplicarea principiului I al termodinamicii în cazul unui organism, conduce la enunțarea următorului bilanț :

• Energia preluată din mediu = Lucrul mecanic efectuat + Q degajată + Energia depozitată în rezervele organismului.

$$\Delta W = \Delta L + \Delta Q + \Delta W_{dep} \quad (IV.11)$$

În timp ce animalele poikiloterme pot primi din mediu energie sub formă de căldură, în cazul homeotermelor energia preluată constă din energia chimică a alimentelor, din care o parte se pierde prin excreție.

Deoarece nu se pot măsura cu precizie cei patru termeni din relația de mai sus, se lucrează în condiții în care organismul este în repaos (nu efectuează lucru mecanic) și nu a mâncat de cel puțin 12 ore, deci nu a preluat energie din mediu. Atunci bilanțul energetic se scrie :

$Q \text{ degajată} + \text{Energia depozitată} = 0$

$Q \text{ degajată} = - \text{Energia depozitată} = \text{Energia utilizată}$

Determinarea producerii de căldură în organism constituie testul clinic al intensității metabolismului bazal.

Acesta reprezintă valoarea de referință față de care se raportează efectul diferiților factori care influențează metabolismul energetic.

IV.2.4. Principiul al II-lea al termodinamicii

Entropia (S)

Conform primului principiu al termodinamicii nu este posibil un proces în care nu se conservă energia. Există însă procese care respectă această lege și totuși nu se petrec în realitate.

De exemplu căldura trece de la corpul mai cald la corpul mai rece, invers însă nu se realizează niciodată de la sine (fără consum energetic din afară). Experiența arată că procesele se produc într-un sens bine determinat. Principiul I al termodinamicii nu dă însă nici o explicație în acest sens.

Procesele care se petrec numai într-un anumit sens se numesc ireversibile. Dacă un sistem trece dintr-o stare A în starea B și la revenirea în starea inițială, starea mediului înconjurător este diferită de cea inițială, procesul este ireversibil.

Procesele reale sunt ireversibile.

Un sistem care inițial nu este în echilibru (are gradient de concentrație, temperatură) evoluează întotdeauna în sensul trecerii spre starea de echilibru.

Căldura nu trece de la sine de la corpul mai rece la corpul mai cald este formularea lui Clausius pentru principiul al II-lea al termodinamicii.

Kelvin a arătat că nu se poate efectua un proces în care să se transforme complet căldura în lucru mecanic ceea ce constituie o altă formulare pentru principiul al II-lea al termodinamicii.

Pentru definirea matematică a acestui principiu Clausius introduce o funcție de stare (așa cum este energia internă pentru principiul I al termodinamicii) entropia, S.

Principiul al II-lea al termodinamicii afirmă că în timpul proceselor naturale entropia unui sistem izolat crește, atingând valoarea maximă la echilibru termodinamic.

Acest principiu se scrie sub forma :

$$\Delta S \geq 0$$

(IV.12)

Semnul ">" se referă la procesele ireversibile iar semnul de egalitate se referă la cele reversibile.

Principiul al II-lea al termodinamicii se mai numește principiul creșterii entropiei.

Clausius a definit entropia pentru procesele reversibile sub forma :

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

(IV.13)

iar pentru cele ireversibile

$$dS > \frac{\delta Q}{T} \quad (IV.14)$$

Deci pentru procesele reversibile căldura schimbată într-un proces termodinamic este:

$$\Delta Q = \int T dS \quad (IV.15)$$

și este interpretată geometric drept suprafața hașurată din Fig. IV.2

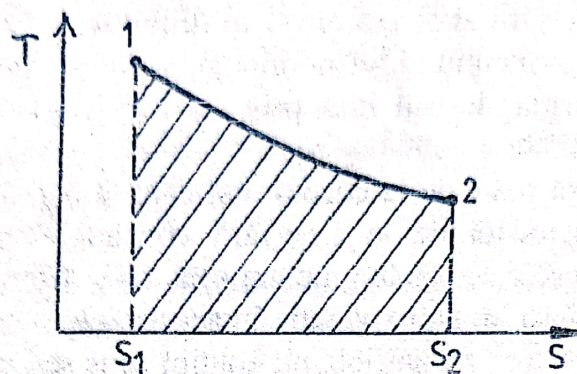


Fig. IV.2

Atunci pentru procesele reversibile, din (IV.8) și (IV.13) se obține

$$T dS = dU + p dV \quad \text{— ecuația termodinamică} \quad (IV.16)$$

Expresia (IV.16) este **ecuația termodinamică**

O altă formulare a principiului al II-lea al termodinamicii constă în imposibilitatea construcției unui *perpetuum mobile de speța II-a* care ar da energie (lucru mecanic) pe seama răcirii unui singur rezervor termic.

De exemplu, nu se poate realiza un motor care să lucreze pe seama răcirii apei oceanelor. Deci deși plutește pe un "ocean de energie", omenirea folosește tot benzină sau cărbuni.

IV.2.5. Ciclul Carnot

Cea mai importantă aplicație a principiilor termodinamicii este ciclul Carnot, un ciclu termodinamic închis, format din două transformări adiabatice și două transformări izoterme, care într-un sistem de axe T, S se reprezintă sub forma unui dreptunghi, ca în Fig. IV.3

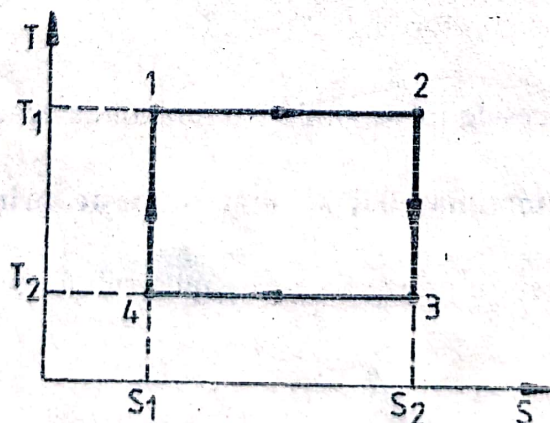


Fig. IV.3

Randamentul motorului termic ce funcționează după un astfel de ciclu este :

$$\eta = \frac{L}{Q} \quad (\text{IV.17})$$

unde L este lucrul mecanic produs de motor iar Q căldura primită de motor. Întrucât ciclul este închis, variația totală de energie internă este nulă și, conform principiului I al termodinamicii ,

$$L = Q_1 - Q_2 \quad (\text{IV.18})$$

Q_1 fiind căldura primită de la izvorul cald iar Q_2 căldura cedată izvorului rece. Din (IV.17) și (IV.18) se obține :

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (\text{IV.19})$$

Dar conform definiției (IV.15) se poate scrie :

$$\begin{aligned} Q_1 &= T_1(S_2 - S_1), \\ Q_2 &= T_2(S_1 - S_2) \end{aligned} \quad (\text{IV.20})$$

Aici T_1 și T_2 reprezintă temperatura izvorului cald, respectiv rece iar S_1 și S_2 entropiile în stările respective.

• Pentru randamentul motorului termic se obține atunci după (IV.19) :

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}} \quad (\text{IV.21})$$

Din expresia (IV.21) se obține o altă formulare a principiului al II-lea al termodinamicii.

Randamentul unui motor termic este întotdeauna subunitar întrucât T_1 nu poate fi ∞ și nici T_2 nu poate fi 0. (fapt ce vom demonstra și în continuare)

IV.2.6. Principiul al III-lea al termodinamicii

Principiul al II-lea al termodinamicii nu face nici o precizare cu privire la comportarea sistemelor în vecinătatea temperaturii de zero absolut (0°K) și posibilitatea atingerii acestei temperaturi.

Principiul al III-lea al termodinamicii se referă la entropia unui sistem a cărui temperatură tinde la 0°K .

✱ *Principiul al III-lea al termodinamicii precizează că entropia oricărui sistem la temperatura de 0°K este nulă.*

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0 \quad (\text{IV.22})$$

și ca o consecință nici un sistem nu poate fi răcit la temperatura de 0K .

Pentru a demonstra această consecință să considerăm un ciclu Carnot dat în Fig.IV.4.

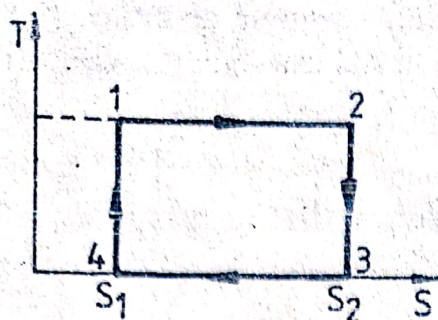


Fig. IV.4

Cum ciclul este reversibil și entropia este o funcție de stare (variația acestei mărimi depinde doar de starea inițială și finală și nu și de procesele prin care trece sistemul) variația de entropie totală va fi nulă, adică :

$$\Delta S_{12} + \Delta S_{23} + \Delta S_{34} + \Delta S_{41} = 0 \quad (\text{IV.23})$$

Dar

$$\Delta S_{12} = \frac{Q_1}{T_1} \quad (\text{IV.24})$$

$$\Delta S_{23} = 0 \text{ (transformarea 2 - 3 este o adiabată)} \quad (\text{IV.25})$$

$$\Delta S_{34} = 0 \text{ (conform principiul al III-lea al termodinamicii)} \quad (\text{IV.26})$$

$$\Delta S_{41} = 0 \text{ (transformarea 4 - 1 este o adiabată)} \quad (\text{IV.27})$$

Din (IV.23-IV.27) rezultă că :

$$\Delta S_{12} = \frac{Q_1}{T_1} = 0 \text{ deși } Q_1 \text{ și } T_1 \text{ sunt diferiți de zero.}$$

Rezultă că pe izoterma de zero absolut 3-4 nu se poate coborî, deci temperatura de zero absolut nu poate fi atinsă.

IV.2.7. Capacități calorice

Capacitatea calorică C reprezintă cantitatea de căldură necesară unui corp pentru a-și ridica temperatura cu un grad :

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad < C >_{SI} = \frac{J}{K} \quad (\text{IV.28})$$

Căldura specifică c este capacitatea calorică a unității de masă :

$$c = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT} \quad < c >_{SI} = \frac{J}{Kg.K} \quad (\text{IV.29})$$

Pentru gaze se folosește capacitatea molară care este capacitatea calorică a unui mol de gaz.

$$C_{\text{mol}} = \frac{J}{\text{mol} \cdot K} \quad (\text{IV.30})$$

Căldura molară a gazelor depinde de modul de încălzire a gazelor, care se poate face la volum constant sau la presiune constantă și atunci se poate defini căldura molară la volum constant, C_v , respectiv la presiune constantă, C_p . Legătura între cele două mărimi a fost dată de Robert Mayer sub forma formulei ce-i poartă numele :

$$C_p - C_v = R \quad (\text{IV.31})$$

IV.3. Căldura animală. Termogeneza și termoreglarea

Sursa de energie din corpul animalelor este constituită de hrana acestora care, în urma procesului de oxidare, produce căldură. Lavoisier a arătat la sfârșitul secolului al XVIII-lea că gazul care rezultă prin arderea unui combustibil este identic cu cel rezultat din respirație (CO_2). Măsurând calorimetric căldura rezultată prin arderea cărbunilor și cea rezultată din respirația unui cobai ținut în calorimetru, a văzut că aceasta are aceeași valoare dacă și cantitatea de CO_2 (produs de combustie este cea expirată de cobai) este aceeași. Berthelot, mai târziu, a scăzut din căldura produsă de corpul uman, căldura de excreție.

În prezent căldura animală se consideră a fi rezultanta dintre căldura produsă de organism și pierderile care se produc prin excreție, radiație și evaporare la nivelul pielii și a mucoasei pulmonare.

Un element foarte important în realizarea acestui echilibru energetic îl constituie termoreglarea, adică menținerea echilibrului termic în diferite condiții.

Din punct de vedere al variației temperaturii corpului, animalele se împart în două categorii :

1) **homeoterme** din care fac parte mamiferele și păsările – care se mai numesc și animale “cu sînge cald”. La homeoterme corpul are proprietatea de a-și menține temperatura constantă, indiferent de condițiile de mediu.

2) **poikiloterme** sau heteroterme care sunt nevertebratele și restul vertebratelor pentru care temperatura corpului urmează variațiile mediului înconjurător.

Procesul de producere de căldură de către organismul uman sau animal prin arderea alimentelor se numește termogeneza. Termogeneza este influențată de mai mulți factori, ceea ce a condus la formularea următoarelor legi ale termogenezei :

a) Legea suprafeței

Cantitatea de căldură produsă de corpul animalelor homeoterme este proporțională cu suprafața corpului.

Legea suprafeței arată deci că , pentru homeoterme, cantitatea de căldură degajată de 1m^2 și în timp de o oră este aproximativ constantă.

Intr-adevar, măsurătorile au arătat că aceasta căldură este pentru :

- om : 45,5 cal/m²h
- șoarece : 35,4 cal/m²h
- porumbel : 58,8 cal/m²h

b) Legea căldurii masice

Căldura masică variază invers proporțional cu mărimea animalului (căldura masică este raportul dintre cantitatea de căldură degajată de animal și masa lui) :

$$\frac{Q}{M} < \frac{q}{m}$$

c) Influența învelișului protector

Termogeneza crește odată cu reducerea învelișului protector. Cantitatea de căldură măsurată este mai mare în cazul în care animalului i s-a tuns părul (blana) deoarece degajarea de căldură în exterior este mult mai mică. Observațiile au arătat că, dacă la un iepure cu blană termogeneza a fost de 9,9 cal/h, după tunderea lui, termogeneza a înregistrat o valoare dublă față de cea inițială.

d) Influența activității musculare

În activitate corpul produce mai multă căldură decât în repaos. Astfel, de exemplu, corpul omului adult aflat în repaos degajă aproximativ 2000 kcal/zi, în timp ce la efectuarea unei munci grele căldura degajată se dublează.

Termoreglarea se realizează prin două mijloace :

- 1)- reglarea producerii de căldură care are la bază un proces chimic
- 2)- reglarea pierderilor de căldură, care are la bază un proces fizic.

În mediile cu temperatura scăzută, homeotermele au o rezistență mare. Pentru că 70-80% din căldură se pierde prin radieră și transmisie, singura metoda de apărare împotriva temperaturilor scăzute este micșorarea irigației pielii. Astfel se va produce o vasoconstricție (pielea este mai puțin irigată deci căldura se transmite mai puțin la periferie), pielea se răcește, deci radieră de căldură se micșorează (apare paloarea pielii). Această modificare se produce prin influențe nervoase asupra vaselor de sânge. Pierderile de căldură sunt micșorate la animalele cu blană, datorită blănii. La animalele de apă (foci, morse, balene), stratul de grăsime împiedică pierderile de căldură.

La temperatură ridicată au loc fenomene inverse, are loc o vasodilatație periferică și radiația de căldură a pielii se intensifică. De asemenea se intensifică acțiunea glandelor sudoripare. Animalele care nu au glande sudoripare, elimină apa prin plămâni și secretă salivă. Prin evaporarea apei este frânată la homeoterme ridicarea temperaturii corpului.

Termogeneza și termoreglarea au impus adaptări filogenetice, morfologice și de comportament.

IV.4. Potențiale termodinamice

Potențialele termodinamice caracterizează sensul de evoluție a diferitelor procese termodinamice. Din definiția entropiei și a principiului al II-lea al termodinamicii rezultă :

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$

(IV.32)

sau

$$\delta Q - TdS \leq 0 \quad (IV.33)$$

Dar conform principiului I al termodinamicii obținem :

$$dU + pdV - TdS \leq 0 \quad (IV.34)$$

În cazul unui sistem care evoluează la volum constant, aflat în legătură cu un termostat de temperatură constantă T (o reacție chimică de exemplu), relația de mai sus poate fi scrisă :

$$d(U - TS) = dF \leq 0 \quad (IV.35)$$

Mărimea

$$F = U - TS \quad (IV.36)$$

se numește **energie liberă sau potențial Helmholtz**. Energia liberă, fiind o combinație de funcții de stare, este de asemenea o funcție de stare

Relația (IV.35) arată că un proces izoterm care se desfășoară la volum constant are loc în sensul scăderii energiei libere. În cazul proceselor reversibile la $T = \text{const.}$ și $V = \text{const.}$, $dF = 0$, deci energia liberă rămâne constantă.

Pentru a găsi forma diferențială a energiei libere diferențiem relația de definiție a energiei libere (IV.36) :

$$dF = dU - SdT - TdS \quad (IV.37)$$

Dar din ecuația termodinamicii (IV.16) se poate scrie că :

$$dU = TdS - pdV \quad (IV.38)$$

și înlocuind în (IV.37) se obține, după reducerea termenilor :

$$dF = -SdT - pdV \quad (IV.39)$$

În cazul unui proces în care presiunea și temperatura rămân constante, relația (IV.38) poate fi scrisă :

$$d(U + pV - TS) \leq 0 \quad (IV.40)$$

Funcția

$$G = U + pV - TS \quad (IV.41)$$

se numește **entalpie liberă sau potențial Gibbs** iar mărimea :

$$H = U + pV \quad (IV.42)$$

se numește **entalpie**.

Relația (IV.40) afirmă că procesele termodinamice care au loc la presiune și temperatură constantă se desfășoară în sensul scăderii entalpiei libere.

Formula fundamentală a termodinamicii se obține diferențind expresia entalpiei libere. Din (IV.41) avem :

$$dG = dU + pdV + Vdp - TdS - SdT$$

După înlocuirea energiei interne din ecuația fundamentală a termodinamicii și reducerea termenilor se obține :

$$dG = Vdp - SdT \quad (IV.43)$$

Pentru entalpie se obține asemănător prin diferențiere :

$$dH = dU + pdV + Vdp \quad (IV.44)$$

și după înlocuiri :

$$dH = TdS + Vdp \quad (IV.45)$$

Alte aplicații ale principiilor termodinamicii cum sunt transformările simple ale gazelor sunt date în anexa 3.

IV.5. Principiul al II-lea al termodinamicii pentru procese ireversibile

În cazul proceselor ireversibile, definiția entropiei este :

$$dS > \frac{\delta Q}{T} \quad (\text{IV.46})$$

ceea ce se mai poate scrie sub forma :

$$TdS - \delta Q > 0$$

$$\text{sau } TdS = \delta Q + \delta Q_i \quad (\text{IV.47})$$

unde δQ_i este caldura necompensată. Împărțind prin T se obține :

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \frac{\delta Q_i}{T} \quad (\text{IV.48})$$

$$\text{sau } dS = dS_e + dS_i \quad (\text{IV.49})$$

dS_e fiind entropia schimbată cu exteriorul iar dS_i este entropia produsă în timpul desfășurării procesului ireversibil. Se înțelege că :

$$dS_i > 0 \quad (\text{IV.50})$$

Dacă sistemul se caracterizează prin variația entropiei în unitatea de timp și unitatea de volum și dacă facem notațiile :

$$\frac{dS_e}{dt dV} = -\text{div} \vec{j} \quad (\text{IV.51})$$

$$\frac{dS_i}{dt dV} = \sigma$$

atunci din (IV.49) se obține :

$$\boxed{\frac{dS}{dt dV} = -\text{div} \vec{j} + \sigma} \quad (\text{IV.52})$$

În (IV.52) $\vec{j}$ este vectorul fluxului de entropie, ca urmare a schimbului de entropie cu mediul exterior iar σ se numește **producție de entropie**.

Principiul al II-lea al termodinamicii pentru procese ireversibile se enunță atunci : într-un proces termodinamic ireversibil producția de entropie este pretutindeni și permanent mai mare ca zero. ($\sigma > 0$).

Să găsim în cele ce urmează această producție de entropie. Pentru aceasta să considerăm un proces termodinamic (o reacție chimică de exemplu), pentru care ecuația fundamentală a termodinamicii este :

$$TdS = dU + pdV - \sum_{i=1}^N \mu_i dn_i \quad (\text{IV.53})$$

μ_i fiind potențialul chimic iar n_i numărul de particule din compusul i .

Variația de entropie va fi:

$$dS = \frac{dU}{T} + \frac{p}{T} dV - \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i dn_i}{T} \quad (\text{IV.54})$$

Dacă se modifică temperatura sistemului la T' , dar componentii rămân aceleași, avem la fel:

$$dS' = \frac{dU}{T'} + \frac{p}{T'} dV - \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i dn_i}{T'} \quad (\text{IV.55})$$

Dar $dS_i = dS - dS'$ și considerînd unitatea de volum, se obține:

$$\frac{dS_i}{dt} = \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} \right) \frac{dU}{dt} + \left(\frac{p}{T} - \frac{p}{T'} \right) \frac{dV}{dt} - \sum_{i=1}^N \left(\frac{\mu_i}{T} - \frac{\mu_i}{T'} \right) \frac{dn_i}{dt} \quad (\text{IV.56})$$

sau altfel scris:

$$\frac{dS_i}{dt} = \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \frac{dU}{dt} + \nabla \left(\frac{p}{T} \right) \frac{dV}{dt} - \sum_{i=1}^N \nabla \left(\frac{\mu_i}{T} \right) \frac{dn_i}{dt} \quad (\text{IV.57})$$

Dacă se notează fluxurile marimilor după cum urmează:

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= J_U \\ \frac{dV}{dt} &= J_V \\ \frac{dn_i}{dt} &= J_i \end{aligned} \quad (\text{IV.58})$$

pentru producția de entropie se găsește:

$$\sigma = \nabla \left(\frac{1}{T} \right) J_U + \nabla \left(\frac{p}{T} \right) J_V + \sum \nabla \left(\frac{\mu_i}{T} \right) J_i \quad (\text{IV.59})$$

Deci cauza ireversibilității unor procese o reprezintă gradientii parametrilor intensivi (gradient de temperatură, potențial chimic, etc.)

Acești gradienti reprezintă **forțele termodinamice** (datorită faptului că forțele derivă dintr-un potențial: $F = -\nabla U$).

Deci putem nota:

$$\begin{aligned} F_1 &= X_1 = \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \\ F_2 &= X_2 = \nabla \left(\frac{p}{T} \right) \\ F_3 &= X_3 = \sum \nabla \left(\frac{\mu_i}{T} \right) \end{aligned} \quad (\text{IV.60})$$

și obținem pentru (IV.59) expresia:

$$\sigma = X_U J_U + X_V J_V + X_i J_i \quad (\text{IV.61})$$

sau, în general, pentru orice tip de forță termodinamică :

$$\sigma = \sum X_i J_i \quad (\text{IV.62})$$

Se poate arăta că fluxurile termodinamice sunt proporționale cu forțele termodinamice care le produc.

Am aratat deja că, în cazul difuziei, fluxul de substanță este proportional cu gradientul de concentrație :

$$J = -D \nabla c$$

gradientul de concentrație fiind forța termodinamica ce produce fluxul de substanță.

Se poate postula o liniaritate între forțele termodinamice și fluxurile termodinamice, dacă forțele sunt slabe, deci sistemul se află în apropierea echilibrului.

$$J_i = \sum L_{jk} X_k \quad (\text{IV.63})$$

L_{ij} se numesc coeficienți fenomenologici și se pot scrie deci sub forma unei matrici.

Din (IV.61) și (IV.63) se găsește pentru producția de entropie expresia :

$$\sigma = \sum L_{jk} X_j X_k \quad (\text{IV.64})$$

IV.5.1. Entropie și ordine

Evoluția ireversibilă a sistemelor izolate către starea de echilibru termodinamic poate fi descrisă cu ecuația lui Boltzmann. Boltzmann a avut o idee deosebită de a lega entropia, care este un concept macroscopic, de proprietățile microscopice dând astfel o interpretare statistică principiului al II-lea al termodinamicii

Să considerăm că avem un gaz aflat într-un cilindru și, cu ajutorul unui perete despărțitor, se comprimă gazul până ce ocupă doar jumătate din volumul cilindrului. Dacă se înlătură peretele despărțitor, gazul revine la starea inițială cuprinzând tot cilindrul. Deosebirea constă în faptul că în starea inițială toate moleculele se află cu siguranță în aceeași jumătate de volum, în timp ce în starea finală ele se pot afla în oricare din cele două jumătăți. Deci în starea finală pozițiile moleculelor sunt mai puțin cunoscute, starea aceasta este mai puțin ordonată.

• *Entropia este deci o măsură a dezordinii în sensul că starea cu dezordinea cea mai mare are entropia mai mare.*

Pentru a se găsi o legătură între entropie și proprietățile microscopice ale unui sistem termodinamic macroscopic este necesar să se cunoască legătura între stările microscopice și cele macroscopice ale sistemului (între microstări și macrostări).

În cazul unui sistem izolat aflat la echilibru, o stare macroscopică este complet determinată de energia sa, de volumul ocupat de sistem și de numărul

de particule din care este format sistemul (dacă sistemul se află într-o stare de neechilibru, atunci sunt necesare și alte mărimi care caracterizează sistemul).

Descrierea unei microstări este practic imposibilă datorită numărului foarte mare de particule din care se compune sistemul. Pentru descrierea statistică a stărilor de echilibru este suficient să se cunoască numărul de microstări ce corespund la o macrostare dată (în cazul fizicii clasice microstările formează o mulțime nenumărabilă și, ca urmare, evaluarea lor este imposibilă).

• Numărul de microstări corespunzătoare unei macrostări se numește **pondere statistică sau probabilitate termodinamică**. Spre deosebire de probabilitatea matematică care este un raport dintre numărul de cazuri favorabile și numărul total de cazuri, deci este o mărime subunitară, probabilitatea termodinamică este supraunitară deoarece nu se poate calcula numărul total de cazuri.

St. Boltzmann a legat entropia de probabilitatea termodinamică prin relația care-i poartă numele:

$$S = k \ln P$$

k fiind constanta lui Boltzmann iar P probabilitatea termodinamică

Sub această formulare entropia are o interpretare statistică, ea fiind cu atât mai mare cu cât numărul de microstări posibile este mai mare. Deci sensul fizic al noțiunii de entropie este acela de măsură a ordinii atomo-moleculare a sistemului; cu cât sistemul este mai bine structurat, cu atât entropia sa este mai mică, cu cât este mai dezordonat, entropia este mai mare.

Cu această accepțiune, de **indice al ordonării unui sistem**, noțiunea de entropie este larg răspândită în diferite domenii ale științelor naturii și cu deosebire în cadrul sistemelor biologice. Spre deosebire de sistemele mecanice, sistemele termodinamice fac diferența între trecut și viitor, direcția scurgerii timpului fiind dată de creșterea entropiei, deci de creșterea dezordinii.

Stephen W. Hawking, unul dintre cei mai mari fizicieni ai secolului nostru, și în același timp, cel mai tânăr dintre ei, arată în cartea sa "Scurtă istorie a timpului" că "progresul rasei umane în înțelegerea universului a stabilit un mic colț de ordine într-un univers din ce în ce mai dezordonat".

Astfel, prin citirea cărții lui, memoria cititorului a înregistrat aproximativ două milioane de informații, deci ordinea din creierul cititorului a crescut tot cu două milioane de unități. În timpul citirii cărții însă au fost transformate cel puțin o mie de calorii, de energie ordonată, căpătate din hrană, în energie dezordonată, sub formă de căldură cedată aerului din jur sub formă de conversație și transpirație. Această energie va mări dezordinea universului cu circa douăzeci de milioane de milioane de milioane de ori mai mult decât creșterea ordinii din creierul cititorului.

IV.6. Termodinamica sistemelor vii

Principiul al II-lea al termodinamicii arată că toate procesele fizice și chimice reale (care sunt ireversibile) se desfășoară de la sine în sensul creșterii entropiei sistemului până la atingerea valorii maxime la echilibru, creșterea entropiei făcându-se în mod continuu. Ireversibilitatea proceselor mecanice este explicată detaliat în anexa 4.

Degradarea naturală și tendința generală de creștere a entropiei (spre o dezordine din ce în ce mai mare) sunt universale. Acesta este motivul pentru care, I. Prigogine, belgian de origine rusă (premiul Nobel pentru chimie în anul 1977) a extins principiul al II-lea al termodinamicii afirmând chiar că "pentru un sistem izolat, viitorul este dat de sensul în care entropia crește". De altfel, principiul al II-lea al termodinamicii a fost denumit de Prof. H.F. Blum de la Universitatea Princeton ca "săgeată a timpului" în sensul că timpul se scurge în sensul creșterii entropiei. (timpul, ca și procesele reale din lumea vie, sunt ireversibile).

Imediat după formularea principiului al II-lea al termodinamicii a fost remarcată comportarea diametral opusă a organismelor vii.

Erwin Schrodinger, premiul Nobel în 1933, a dat formularea celebră acestor observații, arătând că organismele vii "evită creșterea entropiei", preluând din exterior entropie negativă (negentropy). Autorul arată că animalele ingeră produși cu entropie scăzută (se hrănesc cu entropie negativă) și elimină produși cu entropie ridicată. Astfel proteinele au entropie scăzută, pe când compușii simpli ca apa, CO_2 , ureea au entropia mare (apa și CO_2 au entropie mai mare decât o cantitate echivalentă de glucoză și oxigen; organismul poate utiliza însă energia liberă rezultată din descompunerea glucozei în cei doi compuși simpli).

O altă comportare opusă principiului al II-lea al termodinamicii este aceea legată de evoluția sistemelor vii care se realizează în sensul creșterii complexității structurale, a creșterii ordinii, deci a scăderii entropiei. Organismele vii își complică structura sintetizând macromolecule complexe și organizându-le într-o arhitectură supramoleculară foarte bine definită. Ca urmare principiului al II-lea al termodinamicii nu este valabil întocmai pentru sistemele vii pentru că acestea sunt sisteme deschise.

Principiul al II-lea al termodinamicii și termodinamica proceselor ireversibile se poate aplica deci sistemelor vii numai dacă se ține cont că acestea sunt sisteme deschise; dezvoltarea acestor sisteme este determinată de o multitudine de factori fizici, chimici și biologici. În sistemele vii se pot produce procese care determină creșterea entropiei cât și altele cu scăderea entropiei, astfel încât în ansamblu entropia să crească. Orice proces care se desfășoară însă împotriva sensului spontan de creștere a entropiei trebuie să consume energie.

În cazul sistemelor deschise, Prigogine a arătat că entropia poate varia pe două căi:

- a) datorită schimbului de entropie cu exteriorul;
- b) datorită proceselor ireversibile din interiorul sistemelor

După cum am arătat în (II.49)

$$dS = dS_i + dS_e \quad \text{și} \quad dS_i > 0$$

În cazul când sistemul evoluează spre o stare de entropie mai mică decât cea inițială, dS este negativă. Aceasta are loc atunci când

$$dS_e < 0 \quad \text{și} \quad |dS_e| > |dS_i|.$$

IV.6.1. Sistemele biologice ca structuri disipative

Termodinamica proceselor ireversibile explică scăderea entropiei într-un sistem deschis, dacă acesta elimină în exterior mai multă entropie decât produce.

Din punct de vedere al structurii lor, sistemele termodinamice pot fi de două feluri:

a) Structuri de echilibru (cristale) apărute prin scăderea entropiei produsă de scăderea temperaturii.

b) Structuri disipative, care se mențin numai în cadrul unui schimb continuu de energie (disipare de energie).

Procesele, din punct de vedere al sensului variației entropiei, pot fi:

1) Procese cuplante, când entropia crește;

2) Procese cuplate, când entropia scade

Existența cuplajelor explică fenomenele biologice care se desfășoară antientropic. Astfel fenomenele biologice de biosinteză a unor compuși complecși și ansamblare a lor în cursul creșterii organismelor sunt procese cuplate (consumatoare de energie). Acestea însă se desfășoară pe baza reacțiilor catabolice care sunt procese cuplante.

IV.6.2. Termodinamica sistemelor liniare

Sistemul care este supus unor forțe termodinamice slabe și între forțele și fluxurile termodinamice există o dependență liniară, dependență dată de ecuațiile fenomenologice (IV.63) se spune că este un sistem liniar. Aceste sisteme sunt studiate de termodinamica liniară a proceselor ireversibile. De asemenea, în domeniul liniar, matricea coeficienților fenomenologici este simetrică.

Studiul domeniului liniar al proceselor ireversibile permite evidențierea unor proprietăți importante ale sistemelor termodinamice, și acesta va fi scopul acestui capitol.

În absența forțelor termodinamice primare, sistemul tinde spre starea de echilibru termodinamic. Entropia crește în timp, însă pe măsură ce sistemul se apropie de echilibru, creșterea este din ce în ce mai mică. Deci producția de entropie scade spre echilibru. Când forțele termodinamice devin nule entropia ajunge la valoarea maximă, și sistemele închise ajung la echilibru termodinamic. Potențialele termodinamice variază și ele continuu ajungând la valori minime. În cazul sistemelor deschise, starea de echilibru termodinamic nu există. Dacă forțele termodinamice sunt mici, sistemul se îndreaptă spre o stare în care producția de entropie este minimă, adică spre o stare care este cât mai aproape de echilibru, care este starea staționară.

Glansdorf și Prigogine au arătat că în condiții staționare, apropiate de echilibru, pentru forțe termodinamice mici, o distribuție neomogenă este instabilă, tinzând să dispară.

IV.6.3. Cuplajul fluxurilor

În limbaj matematic, cuplajul fluxurilor este determinat de faptul că, în matricea coeficienților fenomenologici, coeficienții nediagonali sunt nenuli.

Să considerăm, spre exemplu două fluxuri.

În vecinătatea echilibrului, conform teoremei Onsager, coeficienții fenomenologici formează o matrice simetrică. Pentru că $\sigma > 0$, coeficienții fenomenologici trebuie să îndeplinească niște condiții

Fie cele două fluxuri de forma :

$$\begin{aligned} J_1 &= L_{11} X_1 + L_{12} X_2 \\ J_2 &= L_{21} X_1 + L_{22} X_2 \end{aligned} \quad (\text{IV.65})$$

Atunci pentru producția de entropie se găsește :

$$\sigma = L_{11} X_1^2 + (L_{12} + L_{21}) X_1 X_2 + L_{22} X_2^2 > 0 \quad (\text{IV.66})$$

Dar $\sigma = 0$ dacă și numai dacă $X_1 = X_2 = 0$

Pentru ca $\sigma > 0$ trebuie ca L_{11} și $L_{22} > 0$ și

$$(L_{12} + L_{21})^2 - 4 L_{11} L_{22} < 0 \quad (\text{IV.67})$$

ceea ce impune în general, pentru că $L_{ij} = L_{ji}$,

$$L_{12}^2 < L_{11} L_{22}$$

Adică, în cazul general să avem :

$$L_{ii} > 0 \text{ și } L_{ii} L_{jj} > L_{ij}^2 \quad (\text{IV.68})$$

Trebuie subliniat faptul că $\sigma > 0$ se aplică, după cum se vede sumei $\sum X_i J_i$ ca întreg. Unii termeni L_{ij} pot fi și negativi, dar un singur flux separat este imposibil deoarece atunci suma se reduce la un singur termen și $X_i J_i < 0$. Într-un sistem deschis însă, acest lucru este posibil.

Exemple de fluxuri cuplate :

1) Amestecul a două gaze avînd temperaturi diferite aflate într-un recipient se separă spontan astfel încît unul din gaze să se concentreze în partea caldă iar celălalt în partea rece. Acesta este fenomenul de **termodifuzie**. Curentul de substanță va fi în sens opus scăderii concentrației (invers decît în cazul difuziei) pentru că este cuplat cu curentul caloric mergînd de la partea mai caldă spre cea mai rece. Astfel lipsa de entropie dintr-un proces se regăsește prin producerea de entropie în celălalt.

2) Cuplajul între două reacții chimice este de asemenea posibil și, în vecinătatea echilibrului, teorema lui Onsager se verifică automat. Cuplajul reacțiilor chimice într-un sistem deschis face posibile reacții endoterme (interzise în sistemele închise) care conduc la creșterea energiei libere (scăderea entropiei). Un exemplu este **formarea lanțurilor proteice**. Cuplajul proceselor endoterme cu hidroliza ATP este universală în biologie. Dacă celulele ar fi sisteme izolate, ATP n-ar putea da energie liberă necesară derulării reacțiilor exoenergetice. Deci, în aproximația liniară, termodinamica proceselor ireversibile, arată că se pot produce, în sistemele deschise, procese interzise în sistemele închise

Conform legii lui Curie, într-un sistem izotrop, cuplajul între un proces scalar și unul vectorial însă nu se poate realiza. Acest cuplaj este interzis și în cazul unui sistem anizotrop dar care are un centru de simetrie.

Dar pentru sistemele biologice, astfel de cuplaje sunt posibile, coeficienții $L_{ik} = L_{ki}$ fiind diferiți de zero.

În acest context, cel mai bun exemplu îl constituie cuplajul între o reacție chimică (ce este un proces scalar) cu transportul prin membrană care este un proces vectorial (transportul prin membrană se face pe o direcție perpendiculară

pe membrana celulară). Organismul este o mașină chimică (celula) care funcționează pe baza acestor cuplaje, prin reacții chimice și de transport de substanță între celulă și mediu (și în interiorul celulei), fluxul de substanță fiind un vector iar viteza de reacție fiind un scalar. Teoria care descrie cuplajul direct al proceselor chimice și difuzia prin membrană, ținând cont de anizotropia membranei, este încă incompletă.

IV.6.4. Stările staționare ale sistemelor liniare.

Un sistem termodinamic deschis se poate găsi într-o stare staționară, puțin dezechilibrat (față de echilibrul termodinamic).

Stările staționare pot fi definite astfel: dacă sistemul deschis nu este lăsat să evolueze spontan, ci prin intermediul unei acțiuni din afară, forțele termodinamice sunt menținute constante, sistemul nu ajunge la starea de echilibru termodinamic (când forțele termodinamice sunt nule), ci ajunge într-o stare de echilibru dinamic, când toate mărimile sunt constante.

Starea staționară este acea stare în care forțele și fluxurile termodinamice care acționează într-un sistem termodinamic rămân constante în timp.

În starea staționară :

$$dS = dS_i + dS_e = 0, \text{ și atunci :}$$

$$dS_i = -dS_e$$

Deci un sistem aflat într-o stare staționară elimină în exterior toată entropia pe care o produce în procesele ireversibile din interiorul său.

IV.6.5. Teorema Prigogine Glandsdorf.

Să considerăm o stare staționară în care sistemul prezintă un flux termic J_t , fluxul de masă fiind nul ($J_m = 0$). Fluxurile termice și masice se scriu :

$$J_t = L_{11} X_t + L_{12} X_m = 0$$

$$J_m = L_{21} X_t + L_{22} X_m = 0 \quad (IV.69)$$

Considerăm în cele ce urmează că forța termodinamică X_t este fixă, adică temperatura este constantă. Expresia entropiei este dată de formula (IV.62). Derivând această expresie în raport cu X_m , menținând pe X_t constant, obținem :

$$d\sigma / dX_m = 2 L_{22} X_m + (L_{12} + L_{21}) X_t$$

Dacă sistemul este aproape de echilibru, conform teoremei Onsager, coeficienții fenomenologici sunt simetrici și atunci se obține :

$$d\sigma / dX_m = 2 (L_{12} X_t + L_{22} X_m) = 2 J_m = 0$$

Derivând încă o dată în raport cu X_m , se obține din nou :

$$d^2 \sigma / dX_m^2 = 2 L_{22} > 0$$

Deci, în starea staționară, aproape de echilibru, producția de entropie este minimă. Aceasta este teorema Prigogine și Glandsdorf.

Teorema Prigogine este valabilă indiferent de relația dintre forțe și fluxurile termodinamice (relații liniare sau neliniare). Această teoremă este forma generală a criteriului evoluției și arată că forțele termodinamice se modifică astfel încât producția de entropie a sistemului să fie cât mai mică.

Datorită gradului înalt de generalizare, această lege a fost denumită "criteriul universal al evoluției".

Teorema lui Prigogine asupra minimului producției de entropie furnizează un criteriu de evoluție în sensul că sistemul se adaptează și regăsește în maniera necesară, starea staționară, pornind de la orice stare vecină.

Starea staționară este o stare stabilă.

Dacă se reprezintă producția de entropie în funcție de un parametru intensiv a_i , ce determină starea staționară, vom obține curba dată în Fig. IV.5. Orice fluctuație dată a unuia dintre parametri de la valoarea corespunzătoare stării staționare a_i^0 îndepărtează sistemul de la starea staționară, deci în starea perturbată vecină, sistemul va produce mai multă entropie.

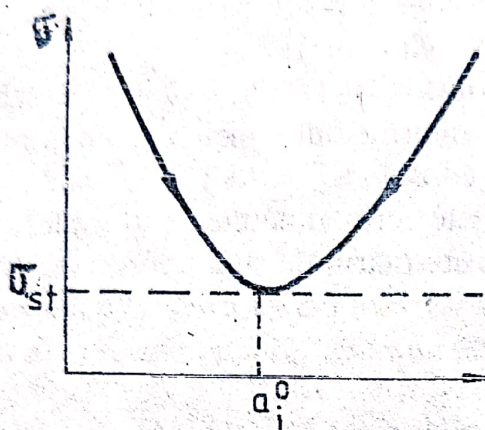


Fig. IV.5

Facem din nou observația că aceste aspecte sunt valabile în cazul linearității, deci în cazul când forțele termodinamice sunt mici și matricea coeficienților fenomenologici este simetrică. Teorema minimului producției de entropie constituie criteriul de stabilitate a stării staționare în domeniul liniar arătând faptul că evoluția unui sistem datorită fluctuațiilor, pornind de la starea staționară, este imposibilă. Din punct de vedere al producției de entropie, în starea staționară, sistemul se găsește într-o "groapă de potențial" din care nu poate ieși.

Deci în domeniul liniar este imposibilă apariția ordinii. Atâta timp cât starea staționară este stabilă, sistemul nu poate evolua, datorită fluctuațiilor, către structuri ordonate temporal sau spațial. Să exemplificăm o astfel de stare staționară comparând o reacție chimică, cu curgerea unui lichid. Dacă sistemul este închis, (lichidul nu se varsă în alte recipiente) lichidul va curge în recipientul inferior cu o viteză care va depinde de deschiderea robinetului, după care se va stabili o stare de echilibru (Fig. IV.6). Nivelul lichidului din recipient va reprezenta avansul reacției chimice în acea stare.

Dacă sistemul este deschis, se va vedea că se stabilește în cele două recipiente un nivel, dar care nu corespunde echilibrului (Fig. IV.7). Acest nivel depinde de viteza staționară de curgere, adică de deschiderea robinetului. Robinetul poate fi asimilat cu un catalizator, care grăbește sau încetinește reacția chimică.

În cazul sistemului închis, gradul final de avansare a reacției nu depinde de viteza sa, ceea ce este arătat de faptul că în final se va stabili un nivel constant de lichid, care nu depinde de deschiderea robinetului.

În sistemul deschis însă, nu numai viteza ci și avansarea reacției depind de catalizator. Când deschiderea robinetului variază, se stabilesc noi nivele ale lichidului, ce corespund la noi stări staționare.

Se poate demonstra că vitezele constante corespund minimului producției de entropie.

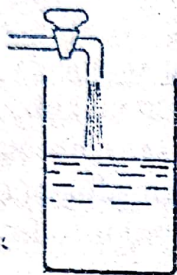


Fig. IV.6

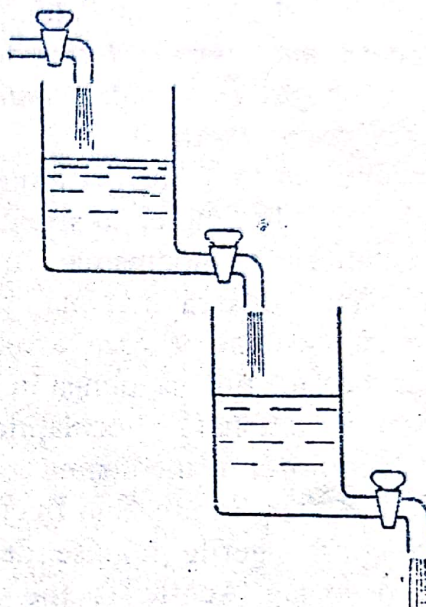


Fig. IV.7

Organismele vii sunt sisteme care sunt caracterizate de stări staționare. De exemplu în cazul animalelor, parametrii fizico-chimici se modifică brusc la naștere, rămânând apoi aproximativ constanți când evoluează spre maturitate (între niște limite tolerabile). Deci organismul poate fi considerat un sistem pentru care forțele termodinamice sunt constante; el se găsește într-o stare staționară. În această stare, greutatea sa (ca și alte caracteristici) rămâne constantă și prezintă un maxim de rezistență față de perturbatorii externi. Pentru ca funcțiile celulare să se mențină staționare, la organismele superioare s-au dezvoltat mecanismele homeostatice prin care organismul își menține parametrii constanți ai mediului său interior (de exemplu temperatura). În organism, curgerea staționară de substanță și energie (homeostază sau homeoreza) este menținută pentru un timp inferior timpului de viață (de la naștere până la moarte).

Deci starea staționară nu se realizează decât în prezența a două scări temporale.

Un alt exemplu este biosfera, care se găsește într-o stare aproximativ staționară, un timp însă care este mult mai mic decât timpul care durează până când Soarele începe să se răcească.

IV.6.6 Procese departe de echilibru

Așa cum am arătat în capitolele anterioare, Entropia, ca măsură a ireversibilității crește în timp, însă pe măsură ce se apropie de echilibru, creșterea este din ce în ce mai mică. Deci producția de entropie scade spre echilibrul termodinamic. Când forțele termodinamice devin nule, entropia ajunge la valoarea maximă și sistemul se află la echilibru termodinamic. (aceasta se întâmplă numai pentru sistemele izolate). În același timp, potențialele termodinamice variază continuu ajungând la valori minime.

Extremul unui potențial termodinamic definește starea de atracție, este deci un atractor spre care tinde spontan orice sistem termodinamic izolat (pentru atractori a se vedea anexa 4).

Principiul lui Le Chatelier arată că stările de echilibru sunt stabile față de perturbațiile mici. În timp ce în sistemele izolate entropia atinge un maxim, deci se obține echilibrul termodinamic, în sistemele închise și deschise, entropia nu atinge niciodată valoarea maximă, deci starea de echilibru termodinamic nu există. În cazul sistemelor care evoluează în apropierea echilibrului, deci în regim liniar, acestea tind să ajungă în starea staționară, care este stabilă.

În starea staționară, fluctuațiile nu pot afecta comportarea sistemului. Departe de echilibrul termodinamic, însă, când forțele termodinamice sunt mari, în domeniul neliniar, în prezența fluctuațiilor, unele sisteme se restructurează ca răspuns la constrîngerile impuse de mediul exterior și pot deveni structuri organizate, ordonate. Aceste sisteme se numesc sisteme cu autoorganizare.

Deci ordinea temporală sau spațială apare departe de echilibrul termodinamic.

1) La echilibru termodinamic, predomină dezordinea.

În natură se întâlnesc structuri care comportă două tipuri de ordine: ordine statică și ordine dinamică. În primul caz ordinea se realizează în condiții de echilibru termodinamic, la o temperatură suficient de joasă. (de exemplu cristalizarea unui lichid). Ordinea statică rezultă printr-o tranziție de fază ale cărei condiții sunt echilibrate. Biologia însă nu are de a face cu astfel de ordine statică, ci aici predomină ordinea dinamică. Ea nu este o consecință a scăderii entropiei pe baza scăderii temperaturii, ci se realizează prin emisie de entropie de către sistem spre mediul exterior. Apariția unei noi structuri spațio-temporale prezintă caracterul unei tranziții de fază, dar aceasta nu este echilibrată. Studiul ordinii dinamice este la început, folosindu-se în prezent modelele fizice și chimice.

2) Ordinea dinamică se manifestă în cazul laserului.

Atomii laserului sunt excitați din exterior prin pompaj optic. Fiecare atom al laserului emite impulsuri luminoase (emisii durînd circa 10^{-8} secunde) cu lungimea de undă mai mică de 5m. Atomii emit aceste impulsuri luminoase independente, fără să sufere influența celui alt.

Totuși, când pompajul atinge o anumită valoare, se produce trecerea bruscă la o radiație coerentă cu lungimea de undă ajungînt pînă la 300.000 Km, de o intensitate mult mai mare. Laserul este un sistem deschis, departe de

echilibru în care există o ordine dinamică de auto-organizare a radiațiilor coerente

Apariția ordinii dinamice este rezultatul instabilității stărilor de echilibru și staționare ale sistemului.

3) Instabilitatea Benard este un alt exemplu de ordine dinamică.

Un lichid încălzit de dedesubt, trece începând de la un anumit gradient de temperatură, într-o stare de mișcare de convecție internă, formând structuri ordonate. Convecția este fenomenul de apariție a mișcării ordonate a moleculelor în fluide supuse unei încălziri neuniforme. Acest fenomen este cel mai convingător exemplu de autoorganizare, de apariție a ordinii din dezordine, din haos. Subliniem aici că mici curenți de convecție apar continuu ca fluctuații, dar sub o anumită valoare critică a gradientului de temperatură, aceste fluctuații regresează.

Dincolo de valoarea critică, fluctuațiile se amplifică și dau naștere la un curent macroscopic ordonat. Apare o ordine nouă care se menține numai prin consum de energie din exterior. Este ordinea prin fluctuații. Aceste structuri apar ca rezultat a două tendințe opuse: efectele disipative care conduc la o stabilitate prin mărirea dezordinii și efectele convective care conduc la o destabilizare, în urma căreia sistemul execută tranziția de fază spre starea ordonată. Lichidul se autoorganizează sub forma unor prisme hexagonale pe axa cărora lichidul coboară iar pe fețele laterale lichidul urcă (Fig. IV.8). Dacă gradientul de temperatură crește în continuare, atunci stratul de lichid ia forma unor rulouri (Fig. IV.9). Efectul este explicat de neliniaritatea ecuațiilor hidrodinamicii. De asemenea, procesele autocatalitice neliniare conduc la apariția de structuri ordonate.

Deci, într-un sistem închis, la echilibru, ordinea apare în conformitate cu principiul minimului energiei libere, pe când într-un sistem disipativ, ea apare ca urmare a amplificării fluctuațiilor până la nivel macroscopic.

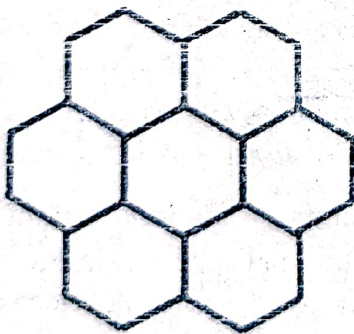


Fig. IV.8

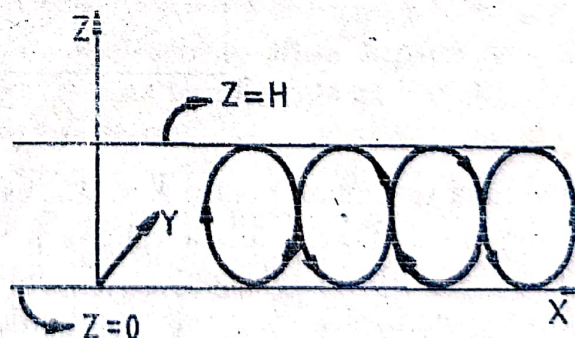


Fig. IV.9

Domeniul biofizicii care se ocupă cu studiul sistemelor disipative se numește **sinergetica**.

IV.6.7. Evoluția sistemelor termodinamice departe de echilibru

Evoluția unui sistem izolat, pornind de la starea de echilibru, este imposibilă. Orice fluctuație care apare în interiorul unui sistem izolat, regresează. În astfel de sisteme nu se mai poate întâmpla nimic cu sistemul. Dacă sistemul este deschis, sistemul se îndepărtează de starea de echilibru. Când forțele termodinamice nu sunt prea mari, întotdeauna sistemul va evolua spre o stare staționară de neechilibru. Și în acest caz, ca și în cazul echilibrului termodinamic, starea staționară rămâne stabilă la fluctuații.

Deci, în vecinătatea echilibrului, în domeniul liniar al termodinamicii proceselor ireversibile, când forțele termodinamice sunt slabe, sistemul se adaptează constrângerilor mediului și evoluția este imposibilă.

Dacă forțele termodinamice depășesc o anumită valoare critică ne situăm în domeniul neliniar al termodinamicii proceselor ireversibile. Chiar și în aceste condiții, dacă evoluția temporală poate fi descrisă cu ajutorul unor ecuații liniare, sistemul nu se autoorganizează. Dacă însă evoluția este descrisă cu ajutorul unor ecuații neliniare, starea staționară devine instabilă la fluctuații și sistemul se autoorganizează. Neliniaritatea transformărilor chimice a permis materiei o evoluție naturală de la structuri simple, către structuri din ce în ce mai complexe, culminând cu structuri autoorganizate, atunci când structura internă și mediul înconjurător au oferit sistemului această șansă. Pentru a ilustra aceste aspecte să reprezentăm o variabilă de compoziție ρ în funcție de un parametru exterior de constrângere λ (concentrația unuia dintre reactanți de exemplu) (Fig. IV.10).

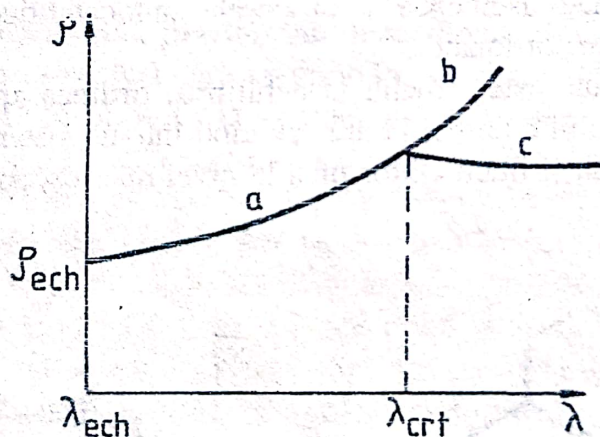


Fig. IV.10

Evoluția sistemului pentru $\lambda < \lambda_{crit}$ este liniară și starea staționară rămâne stabilă. (ramura a) Peste această valoare începe domeniul neliniar. (ramura b). De acum orice fluctuațiile obligă sistemul să evolueze departe de această ramură. El poate evolua spre o structură ordonată sau poate exploda.

Deci dacă ne aflăm pe domeniul liniar (a), fluctuațiile nu au nici o influență asupra stabilității stării staționare. Din contra, la marea distanță de echilibrul termodinamic, dincolo de bifurcație, stările staționare de pe curba b sunt instabile și același sistem se poate restructura ca răspuns la constrângerile mari ce-i sunt impuse din exterior. Deci, în cazul neliniar, când sistemul se găsește departe de echilibrul termodinamic și forțele termodinamice sunt mari, starea

staționară rămîne sau nu stabilă la influența fluctuațiilor, în funcție de structura sa internă.

Astfel dacă ecuațiile cinetice sunt liniare, de cele mai multe ori, starea staționară este stabilă. Dar chiar și atunci cînd ea este instabilă, ea nu admite cicluri limită. Numai atunci cînd parametrul constrîngerilor depășește o valoare critică, procesele devin instabile și sistemul tinde să se autoorganizeze. Pentru aceste sisteme, ciclul limită este un atractor, așa cum starea de echilibru termodinamic este un atractor pentru sistemele izolate sau starea staționară pentru sistemele care se află în apropierea echilibrului termodinamic. Studiul sistemelor cu autoorganizare pe baza calculului producției de entropie, a permis formularea ipotezei că variația de entropie crește și ea cu creșterea complexității sistemului.

Un sistem , cu cît este mai complex este și mai ordonat.

Dacă se calculează entropia globală ca diferența între entropia de pe ciclul limită și entropia într-o stare staționară, în același interval de timp, se observă că ea crește cu complexitatea sistemului, deci cu gradul său de organizare. Entropia produsă pe o traiectorie tip ciclu limită este de cele mai multe ori mai mare decît cea produsă în starea staționară în același interval de timp.

Deci în cazul sistemelor cu autoorganizare, entropia crește în acord cu principiul al II-lea al termodinamicii

IV.6.8. Evoluția sistemelor chimice și biologice cu autoorganizare

Evoluția sistemelor chimice și biologice de la cele mai simple la cele mai complexe constituie unul dintre domeniile care preocupă atît pe fizicieni, chimiști și biologi. Existența structurilor disipative și evoluția temporală a acestora a putut fi explicată pe baza dezvoltării termodinamicii neliniare a proceselor ireversibile de către Prigogine, Glansdorf, Mazur, Ross. Astăzi există teorii care susțin faptul că ireversibilitatea transformărilor chimice a permis materiei o evoluție naturală, de la structuri simple către structuri din ce în ce mai complexe, culminînd cu structurile organizate, atunci cînd structura internă și mediul înconjurător au oferit această șansă. Evoluția sistemelor biologice este și ea o consecință a comportării sistemelor deschise, aflate departe de echilibrul termodinamic, la apariția fluctuațiilor. Aceste teorii susțin că evoluția sistemelor biologice a fost posibilă datorită erorilor de replicare a acizilor nucleici. Erorile de replicare conduc la mutații iar speciile apărute se numesc mutanți. Specia nouă care apare ca urmare a erorilor de replicare are o concentrație foarte mică. Dacă ea prezintă proprietăți structurale superioare speciei din care a luat naștere, atunci concentrația ei crește rapid atîngînd pe traiectoria ciclului limită, concentrații de același ordin de mărime ca și a celeilalte specie. Această specie este deci un mutant avantajos.

Pentru ca mutantul să fie avantajos, trebuie ca sistemul să fie menținut departe de echilibrul termodinamic.

Deci sursa principală de noi informații genetice o constituie erorile de replicare. Schrodinger, Eigen și Prigogine au arătat că erorile de replicare sunt

fluctuații care produc noi sisteme organizate. Aceste fluctuații sunt întâmplătoare și independente de mediul exterior.

K. Popper a arătat că mutațiile sunt aleatoare și complet oarbe în ambele sensuri, adică :

- mutațiile nu sunt orientate în nici un fel spre un scop anume ;
- supraviețuirea sau moartea unui mutant nu afectează mutațiile viitoare, nici ca frecvență, nici ca probabilitate de apariție.

În cele ce urmează vom vedea cum se poate produce o eroare de replicare în structura ADN-ului.

Acizii nucleici sunt polinucleotide, nucleotidele fiind constituite, la rândul lor, din: o bază purinică sau pirimidinică, o monozaharidă, o pentoză, un rest de acid fosforic esterificat cu una din grupările hidroxil ale pentozei. În ADN se găsesc două baze purinice adenina(A) și guanina(G) și două baze pirimidinice citozina(C) și timina(T).

Macromoleculele de acizi sunt răsucite în forma unei duble elice. Cele două elice sunt orientate cu resturile de pirimidină și de purină spre interior, astfel că fiecare rest de pirimidină stă în fața unui rest de purină și sunt legate prin legături de hidrogen ; două între A și T și trei între G și C, ceea ce le conferă o anumită stabilitate.

Conform teoriei Watson-Crick, informația conținută într-o elice dublă de ADN constă în succesiunea exact determinată a perechilor de primidine-purine. Informația genetică este deci scrisă prin intermediul unui alfabet format din patru litere A-T, T-A, C-G, G-C. Duplicarea ADN-ului se produce astfel încât cele două elice care îl compun se despart și fiecare din ele funcționează ca o matrice pentru o nouă elice de ADN. Cele două elice de ADN care iau naștere sunt compuse fiecare dintr-o elice veche și una nouă. Dintr-o elice dublă de ADN iau naștere două duble elice perfect identice.

Deoarece legăturile de hidrogen dintre bazele pirimidinice și purinice sunt slabe, este posibil ca de adenină să nu se lege, prin legături de hidrogen, timina ci citozina și astfel să apară o eroare în reaplicarea ADN-ului. Astfel una dintre dublele elice care vor apărea nu va mai fi identică cu dubla elice părinte. În felul acesta apare o specie nouă.

IV.7. Considerații filozofice.

Evoluția sistemelor biologice s-a realizat pe baza creșterii complexității, deoarece aceasta apare ca o necesitate. Această evoluție însă se datorează fluctuațiilor. Fluctuațiile care realizează tranziția de la un sistem oarecare spre un sistem mai complex reprezintă hazardul. Prigogine spunea **"Hazardul și necesitatea au cooperat în loc să se opună"**

Privită într-un context mai general, specia nouă care apare poate fi interpretată ca o idee nouă, care poate schimba comportarea ulterioară a sistemului în interiorul căruia a apărut, dacă, bineînțeles, primește energie din exterior.

Deci pentru ca o idee nouă să apară și să se dezvolte, ea trebuie ajutată din afară .

În încheiere trebuie să spunem că au rămas multe întrebări fără răspuns legate de sistemele biologice, dintre care amintim:

a) existența unei singure mărimi fizice care să caracterizeze structurile disipative

b) selectarea celui mai ordonat sistem dintr-o multitudine de sisteme cu autoorganizare

c) principiul evoluționist care determină comportarea sistemelor

Dar cele mai importante dintre întrebări, rămân următoarele:

Este Pământul cel mai ordonat sistem din Univers, și dacă da, cum s-a ajuns la această ordine?

Este moartea unei viețuitoare o stare de echilibru termodinamic?

Cum a apărut Universul și cum a apărut viața pe Pământ?

Descoperirea unei teorii unitare asupra existenței Universului este visul de aur al fizicienilor teoreticieni. Aceasta însă nu impune și prezicerea evenimentelor ulterioare din două motive. Primul motiv este legat de principiul de incertitudine a lui Heisenberg iar al doilea, de imposibilitatea rezolvării exacte a sistemelor de ecuații. (Nu se poate rezolva nici măcar mișcarea a trei corpuri în mecanica clasică, și dificultatea crește enorm cu complexitatea teoriei și numărul de corpuri.)

În general se cunosc legile de bază care stau la baza chimiei și biologiei. Si totuși, spune Hawking "până acum nu am avut mare succes în prezicerea comportamentului uman din ecuațiile matematice"

Deci o teorie completă, consistentă, reprezintă doar primul pas, scopul fiind înțelegerea completă a evenimentelor din jurul nostru și a propriei noastre existențe.

Până acum oamenii de știință au fost prea preocupați cu elaborarea unor legi și teorii pentru a explica unele aspecte din viață sau din Univers și mai puțin cu răspunsul la întrebări existențiale. Răspunsul la obsedanta întrebare "De ce existăm noi și Universul" ar fi după St. Hawking triumful final al rațiunii umane, pentru că, spune el, "atunci am cunoaște gândirea lui Dumnezeu"

CAPITOLUL V. MEMBRANE BIOLOGICE.

TRANSPORTUL PRIN MEMBRANELE BIOLOGICE

• Celula este cea mai mică formă de organizare a materiei în care mai poate exista viața.

Celulele apar într-o varietate foarte mare, de la celula nervoasă care are mai mult de 1 m pînă la pneumococcus care are $0,2\mu$ în diametru. În același timp, funcțiile lor sunt foarte diferite, de la organisme unicelulare, la cele pluricelulare. Ele au însă în comun un aparat de mare precizie pentru stocarea energiei, de sinteză, un centru de control al acestor reacții și căi de comunicare. În toate aceste cazuri, același tip de molecule și aceeași structură este asociată cu aceleași funcții.

De exemplu sinteza proteinelor are loc în același mod, indiferent de originea biologică a celulelor. Deci din punct de vedere biofizic și biochimic, funcțiile celulare au loc la fel și aceste funcții sunt fundamentale pentru viața. Celulele, din punct de vedere morfologic se împart în două categorii (după E.C. Dougherty, 1957)

a) procariote care nu au un nucleu bine dezvoltat;

b) eucariote, în care nucleul este bine dezvoltat.

În prezent se considera și o a treia grupă de celule, diferite de celelalte. Acestea sunt "archaebacteria" care diferă de celelalte tipuri prin structură și compoziția membranei.

Citoplasma celulei este bine structurată, cea mai importantă parte fiind o rețea fibroasă de proteine numită "cytoskeleton"

Celulele eucariotelor de origine animală sunt diferite de cele vegetale. Atât celulele animale cât și cele vegetale au membrana citoplasmatică; cele vegetale au însă o structură rigidă formată din celulăză sau din material asemănător celulozei, fapt ce le conferă o anumită rigiditate.

Eucariotele au un nucleu bine definit, înconjurat de o membrană nucleară. Un nucleu poate conține unul sau mai mulți nucleoni. În interiorul nucleului se găsește cromatină care constă din ARN și AND, proteine cu mase moleculare mici numite histoni și alte proteine reziduale. AND-ul conține toate informațiile despre morfologia și funcțiile celulei. Celulele eucariotelor conțin cel puțin o mitocondrie care conține enzimele ce produc conversia energiei.

Procariotele nu au organe specializate în diferite funcții însă au membrane care sunt adaptate la o serie de funcții. Structura membranelor depinde de tipul de organism și de condițiile metabolice.

V.1. Structura și funcțiile membranei

Membranele reprezintă o structură comună celulelor, ele apar atât la celule pentru a le separa de exterior, cât și în formațiunile din interiorul celulei. În interiorul

membranei au loc foarte multe procese biofizice și biochimice. Membranele nu au numai un rol static, în delimitarea celulelor și a organelor celulare, ci au un rol dinamic în diverse procese fizice.

Membrana care înconjoară celula, **plasmalema**, (care închide citoplasma) formează o barieră selectivă ce menține integritatea celulei datorită fenomenelor de transport, active și pasive, care au loc prin ea. Aceste procese de transport sunt selective atât în ceea ce privește viteza cât și tipul de molecule care intră sau părăsesc celula.

Membrana, căreia i s-a acordat doar un rol pasiv, de izolare față de mediul exterior, are o structură complexă.

Membranele, după cum se știe, sunt formate dintr-un strat dublu fosfolipidic în care sunt împlântate proteinele. Moleculele fosfolipidice sunt dispuse într-un strat dublu, părțile lor hidrofobe venind în contact iar cele polare rămân libere spre exteriorul, respectiv interiorul celulei. Poziția proteinelor este arbitrară, ele se află din loc în loc, unele traversând complet membrana, iar altele nu. (Fig. V.1)

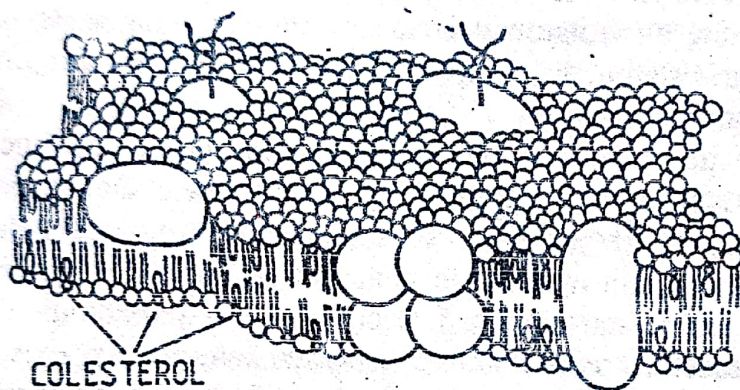


Fig. V.1

Acest model de membrană a fost publicat în anul 1972 în revista **Science** de către **S.J. Singer** și **G.L. Nicolson** și denumit **modelul mozaicului fluid al structurii membranei celulare**. Modelul constă dintr-o "mare" ce constă din stratul dublu lipidic, pe care plutesc proteinele asemenea unor aisberguri. Dublul strat fosfolipidic formează o matrice de circa $60-80 \text{ \AA}$ grosime. Membranele biologice iau naștere prin autoasamblare pe baza efectului hidrofob Lipidele formează spontan în soluții apoase straturi bimoleculare pe care proteinele se adsorb tinzând să-și ascundă propriile lor porțiuni hidrofobe.

Faptul că această dispunere a lipidelor se realizează de la sine în virtutea tendinței oricărui sistem de a atinge stări cât mai stabile (minim de energie) a sugerat posibilitatea realizării de membrane artificiale cu ajutorul cărora să se studieze funcțiile membranei. Ca urmare structura și funcționarea membranei a putut fi studiată pe baza membranelor artificiale, deci membrane model. Membrana, din punct de vedere biofizic, este un fluid în care au loc mișcări laterale la care participă proteinele și lipidele, de rotație în jurul axei proprii și mai rar mișcarea în direcție perpendiculară.

Deci membrana este un fluid structural care își păstrează forma generală, dar ai cărui componenți sunt în continuă mișcare.

Membranele permit grație fluidității, modificări de formă ale celulelor, creșterea celulelor, refacerea celulelor lezate. Fluiditatea membranei se modifică în cazuri patologice: ca infecția virală, acțiunea unor factori externi, tumorile maligne. Explicarea modificării fluidității se face prin procesul de obstrucționare în funcționarea normală a proteinelor integrale. Biomembranele reprezintă circa 10-20% din masa celulară iar proporția de lipide și proteine este diferit.

În cazul membranei, dacă lipidele formează matricea membranei, proteinele asigură funcțiile acesteia.

Funcțiile membranei se împart în trei mari categorii:

a) **rol de frontieră fizică;** ea păstrează și menține o compoziție chimică diferită în interior față de exterior, datorită difuziei selective.

b) **reprezintă locul unde au loc reacții chimice,** locul unor funcții de bază, din care o mare parte a reacțiilor de conversie a energiei.

c) **proteinele constituie receptori în cadrul comunicării intercelulare** (de exemplu teaca de mielină constituie un izolator electric în cazul celulelor nervoase). De asemenea alte membrane au sisteme de recepție a luminii; acestea din urmă reprezintă adaptări la funcțiile specifice.

Cea mai importantă funcție a membranei celulare este de a menține o compoziție chimică puțin diferită în interiorul celulei față de exteriorul său. Această funcție se realizează prin fenomene de transport ale substanțelor din interiorul celulei spre exterior și invers. O mare parte din moleculele și atomii ce intră în compoziția mediului intra și extracelular se află în stare ionizată, deci sunt cationi și anioni. Deși între lichidul intracelular și extracelular există numeroase asemănări, totuși există o deosebire esențială și anume existența unei concentrații ionice diferite. Dintre ionii ce se găsesc în mediul intra și extracelular, cei mai importanți sunt ionii anorganici de Na, K, Cl și Ca iar dintre cei organici, proteinele și polipeptidele. Pentru ionii organici membrana celulară este impermeabilă și ei rămân în general în interiorul celulei în care au luat naștere. Ionii de Na, K, Cl pot trece prin membrană în ambele sensuri, dar concentrația lor nu este aceeași de ambele părți ale membranei. Concentrațiile ionilor se egalează numai după moartea celulei. Astfel concentrația ionului de Na este de 10 ori mai mare în lichidul interstițial decât în cel intracelular, la Cl concentrația ionului este de 14 ori mai mare în lichidul interstițial decât în cel intracelular, în timp ce pentru K concentrația este mai mare în lichidul intracelular de 30 de ori decât în lichidul interstițial.

Datorită diferenței de concentrație, ionii tind să difuzeze prin membrană tinzând spre o egalizare a concentrațiilor. Ionii de Na și Cl tind să difuzeze în interiorul celulei, iar ionii de K și cei organici, spre exteriorul acesteia. Viteza de difuzie depinde atât de concentrația ionilor cât și de permeabilitatea membranei pentru acești ioni. În stare de repaos membrana este impermeabilă pentru anionii organici, are permeabilitate mică pentru ionii de Na și prezintă permeabilitate mare pentru ionii de K și Cl. Permeabilitatea mică a membranei pentru ionii de Na se explică prin faptul că aceștia sunt puternic hidratați și au diametrul mai mare decât ionii de K.

Dacă o membrană semipermeabilă separă o soluție coloidală ai cărei ioni nu pot difuza prin membrană, are loc o repartitie inegală a ionilor difuzibili pe cele două fețe ale membranei ce are ca efect apariția unei diferențe de potențial electric. Acest fenomen a fost studiat de chimistul englez Fr. Donnan care a arătat că acești coloizi electrolitici realizează o stare de echilibru (care se numește echilibru Donnan) ionii repartizându-se pe cele două fețe ale membranei astfel încât produsele concentrațiilor ionilor sunt aceleași pe cele două fețe ale membranei.

Echilibrul Donnan va fi studiat în detaliu într-un capitol special.

V.2. Clasificarea proceselor de transport

Proceselor de transport prin membrană se clasifică după diferite criterii.

După mărimea particulelor ce străbat membrana, transportul poate fi:

- **macrotransfer** – pentru macromolecule și particule
- **microtransfer** - pentru ioni și molecule mici

Ionii și moleculele mici trec mai ales prin proteinele intrinseci pe când macromoleculele trec efectiv odată cu porțiuni din membrană, pentru că sunt transportate în vezicule.

Din punct de vedere al **mecanismului de transport**, acesta poate fi:

- a) **transport pasiv** – care se face în sensul gradientului de concentrație, pentru moleculele neîncărcate și în sensul gradientului electrochimic pentru cele încărcate
- b) **transport activ** – care se face împotriva gradientului de concentrație cu aport energetic din exterior (cu consum de ATP). Transportul activ poate fi

- transport activ primar
- transport activ secundar
- translocare de grup

Microtransferul pasiv se poate face pe următoarele căi:

- a) difuzie simplă - prin dublu strat lipidic
- b) difuzie facilitată
- c) difuzie simplă mediată de proteine canal

Macrotransferul se realizează prin:

- transport direct al macromoleculelor
- transport prin vezicule care poate fi:

1) **endocitoză** (transportul are loc spre interiorul celulei și poate fi:

- a) fagocitoză
- b) pinocitoză-dependentă de receptori
- independentă de receptori

2) **exocitoză** (transportul se realizează din citoplasmă spre exterior)

3) **transcitoză** (veziculele străbat toată celula, dintr-o parte în alta)

Datorită faptului că se admite că transportul se realizează în cea mai mare parte prin proteine de transport, transportul se mai poate clasifica și după **numărul speciilor de substanțe ce pot fi transportate** în:

- uniport-când este transportată prin membrană o singură substanță
- cotransport-dacă transportul unei substanțe este cuplat cu al altei substanțe

Cotransportul poate fi de două feluri:

- simport-dacă trecerea ambelor substanțe se realizează în același sens
- antiport- dacă trecerea ambelor substanțe se realizează în sensuri opuse

V.3. Transportul pasiv

V.3.1. Difuzia simplă

În cazul membranelor biologice difuzia simplă se realizează pe două căi: prin dublul strat lipidic și prin proteinele intrinseci

Difuzia simplă prin stratul bilipidic a fost pusă în evidență de Overton care a arătat că viteza de pătrundere a substanțelor în celulă este proporțională cu solubilitatea acestora în lipide. Difuziunea simplă este guvernată de legea lui Fick (pe care am studiat-o în capitolul "Fluide biologice"). Cantitatea de substanță transportată în funcție de diferența de concentrație are forma unei drepte (Fig. V.2). Pentru moleculele mici hidrofile și pentru apă această explicație a suscitat numeroase controverse. Difuziunea apei este mult mai intensă decât a oricărei substanțe. De aceea s-a admis că în acest caz transportul se realizează prin difuziune simplă mediată de proteine.

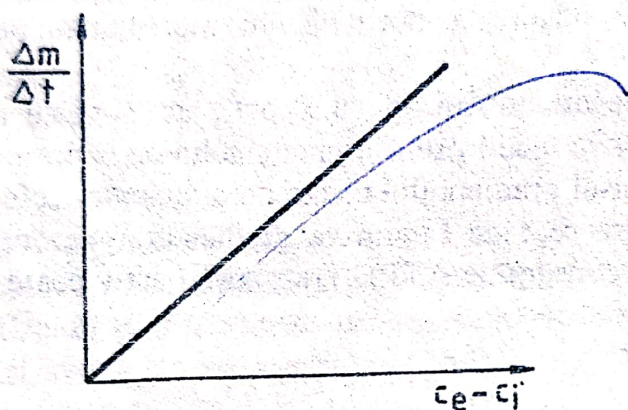


Fig. V.2

De exemplu apa care traversează în cele două sensuri membrana hematiei în timp de o secundă are volumul mai mare de 100 de ori volumul hematiei, dar fluxul net este nul și volumul hematiei rămâne constant. (În anumite condiții poate apărea o diferență de concentrație transmembranară pentru apă și atunci există un flux hidric net ducând la nurgescența celulei). Fenomenul de difuziune a apei prin membranele celulare este fenomenul de osmoză, pus în evidență de Dutrochet în anul 1809, cu mult înainte de a se cunoaște structura membranei celulare. În prezent sunt în studiu și alte fenomene legate de transportul apei sub două aspecte:

a) precizarea stării apei, în special cea intracelulară, unde o parte din molecule sunt în stare liberă iar altele "legate" îndeosebi la nivelul proteinelor.

b) punerea în evidență a structurilor de la nivelul membranei ce concurează la transport:

- c) existența unor pori sau canale specifice apei
- d) existența unor canale sau pori de transport pentru apă și unii anioni
- e) existența unor transportori

Tehnicile de mare precizie a măsurătorilor vor da probabil răspuns la aceste întrebări. Sau poate se va confirma observația lui Schrodinger după care materia vie nu eludează legile fizicii, ci poate să implice "alte legi ale fizicii", necunoscute încă.

Este deci posibil ca unele cercetări din biologie să antreneze noi cercetări în domeniul fizicii, așa cum unele fenomene din fizică au impus dezvoltarea unor noi formalisme matematice care să le poată explica.

V.3.2. Difuziunea facilitată

Ca și în cazul difuziunii simple, difuziunea facilitată conduce doar la un transport de solvit în sensul gradientului de concentrație.

Pentru anumite substanțe transportul prezintă trăsături incompatibile cu difuziunea simplă și anume :

1) difuzează mult mai rapid decât în difuzia simplă (chiar de 100.000 de ori)

2) viteza de difuzie prezintă saturație când concentrația externă a solvitului crește; transportul poate fi inhibat prin analogi structurali ai solvitului.

Dacă se reprezintă grafic viteza de difuzie în funcție de concentrație se obține graficul din Fig. V.3. În cazul difuziei facilitate se consideră că la transport participă un constituent al membranei, cel mai adesea o proteină, care recunoaște solventul, accelerând transportul.

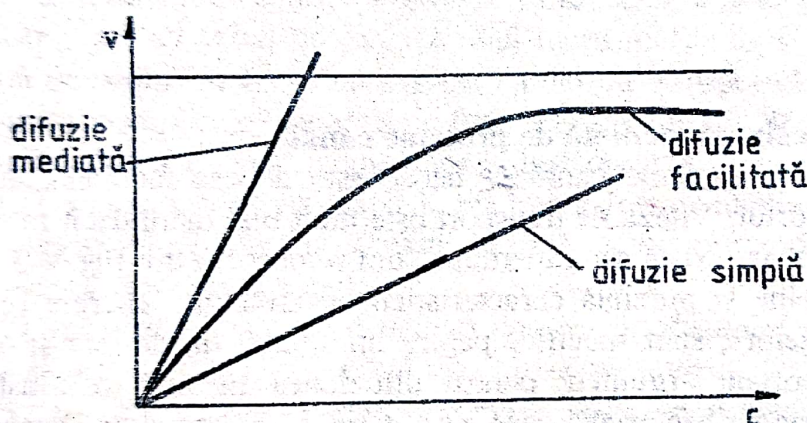


Fig. V.3

Substanțele sunt transportate prin intermediul unor proteine specifice care se comportă ca niște enzime (se și aseamănă cu cataliza enzimatică). Fiecare proteină transportoare prezintă un loc specific de legare a substanței transportate; când toate locurile de legare sunt ocupate, viteza de transport ajunge la o valoare maximă, caracteristică fiecărui transportor, ceea ce explică saturația. Mecanismul difuziei facilitate comportă două etape :

a) substanța transportată este recunoscută de transportator

b) transportul propriu-zis, mecanismul cel mai popular fiind modelul "ping-pong", prezentat în Fig. V.4

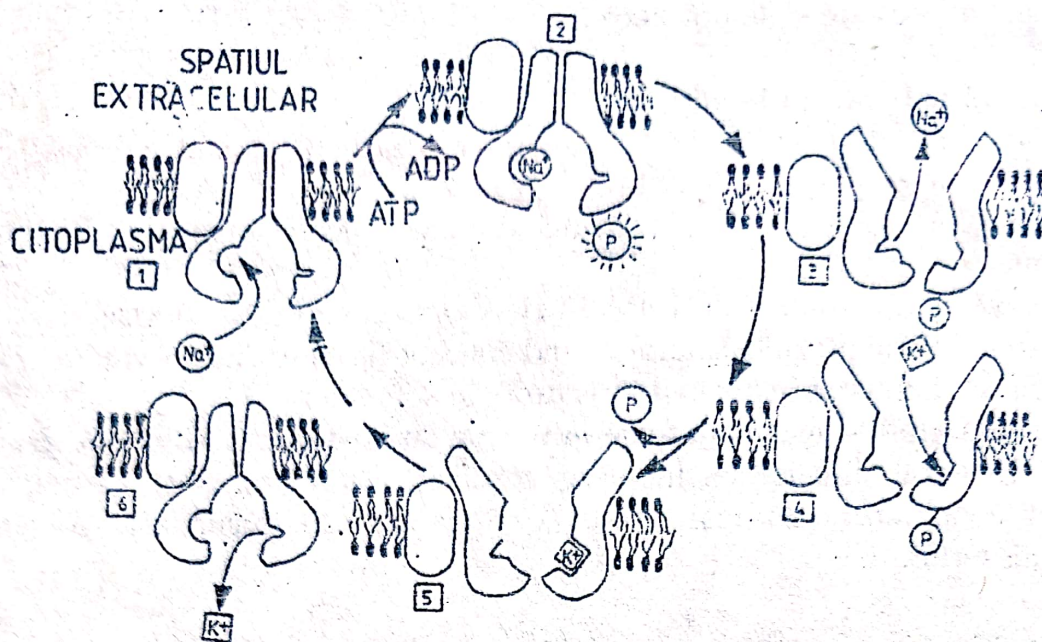


Fig.V.4

V.3.3.Difuzia simplă mediată de proteine canal

Difuziunea mediată de proteine canal se deosebește de cea facilitată deși și aceasta "facilitează" transportul. Viteza de transport este mult mai mare decât în cazul difuziei facilitate și, în plus, nu există saturație (după cum se observă din Fig.V.3.).

Canalele ionice sunt proteine și prezintă caracteristicile enzimelor: energie redusă pentru transportul substanțelor, sunt specifice pentru un anumit tip de ioni și pot fi blocate, etc. Cel mai important argument pentru difuziunea mediată o constituie ionoforii, antibiotice de origine bacteriană care permit trecerea cationilor anorganici prin membranele biologice și artificiale. Ionoforii sunt de două feluri:

a) ionofori ce se comportă ca niște transportori mobili, deci realizează transportul prin mecanismul "carrier" =, transportor, aceștia făcând "naveta" prin membrană. (Fig.V.5)

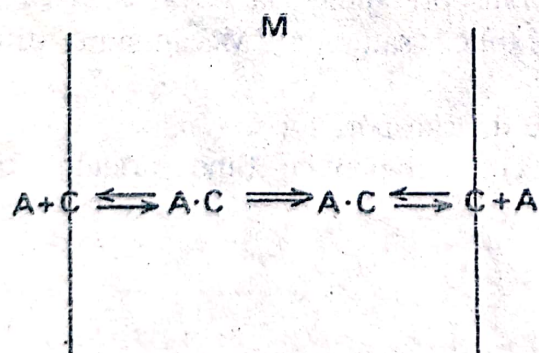


Fig.V.5

Din această categorie face parte valinomicina care prezintă o afinitate mare pentru K^+ ce se fixează în partea centrală a moleculei antibioticului, cei șase atomi din centrul moleculei formînd o "cușcă" în jurul ionului. Deoarece partea externă a moleculei este hidrofobă (deci solubilă în lipide), acest fapt îi permite trecerea prin stratul bilipidic, în interiorul celulei.

b) ionofori ce formează canale prin care pot trece, selectiv, diferiți ioni. De exemplu gramicidina formează un por central cu diametrul de circa $4 \text{ \AA}$ prin care pot trece ioni de Na^+ , K^+ , Rb^+ , H^+ . Transportorii de tipul valinomocinei pot transporta circa 10^4 ioni/s în timp ce prin canale pot trece cîca 10^7 ioni/s.

V.4. Transportul activ prin membranele biologice

Pentru funcționarea celulei vii este necesară asigurarea unei compoziții ionice diferite a citoplasmei față de interstițiu și acumularea selectivă în citoplasmă a unor precursori metabolici ca aminoacizii și monozaharidele în cantități mai mari decît ar permite echilibrul de difuzie. Aceste condiții se realizează prin intermediul transportului activ, ce se produce în sens contrar gradientului de concentrație, cu consum de energie. Mecanismul transportului activ a fost studiat de J. Bernstein, R.B. Dean, care au arătat necesitatea unui lucru metabolic și au introdus noțiunea de "pompa de sodiu" și J. Rosenberg care a definit transportul activ. Un pas decisiv în cunoașterea pompei de Na^+ și K^+ a fost realizat de J.C. Skou care a descoperit că activitatea optimă a unei enzime care hidrolizează ATP la ADP și fosfat anorganic necesită prezența ionilor de Na^+ și K^+ . Enzima a fost denumită $(Na^+, K^+)ATP$ -aza. Așa cum s-a demonstrat ulterior, această enzimă este o proteină membranară și ea este însăși pompa de sodiu și potasiu.

• *Transportul activ are loc în sens contrar gradientului de concentrație, necesită energie și se realizează cu ajutorul unor proteine*

Transportul activ necesită energie și deci trebuie cuplat cu o reacție exoenergetică. Din acest punct de vedere transportul activ poate fi:

- transport activ primar-cînd cuplarea se realizează direct
- transport activ secundar- cînd cuplarea se realizează indirect

V.4.1. Transportul activ primar

Un mecanism al procesului de transport activ poate fi mecanismul "carrier" ce poate fi ilustrat ca în Fig V.6.

În acest caz carrier-ul C este convertit de la o afinitate mare pentru substanța A la o stare de joasă afinitate și vice-versa ($C \leftrightarrow C'$). Această conversie este cuplată la o reacție ce necesită energie. Complexul AC ca și configurația de joasă afinitate C' pot difuza prin membrană. Conversia se face fie de la $C \rightarrow C'$ pe fața II, fie de la $C' \rightarrow C$ pe fața I.

Acest mecanism este justificat de saturația fluxului de substanță prin membrană. Transportul activ este cuplat direct la o reacție exoenergetică constînd de obicei în hidroliza ATP, din care rezultă ADP și P anorganic, cu o eliberare de energie liberă, de circa 30 MJ/Kmol . În cadrul reacției, o ATP-ază servește ca intermediar, catalizînd cele două procese, hidroliza ATP și transportul ionilor.

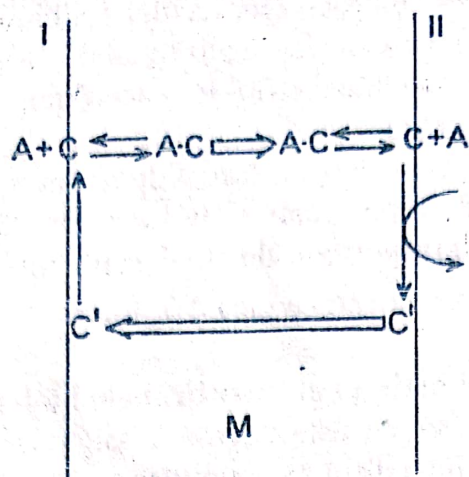
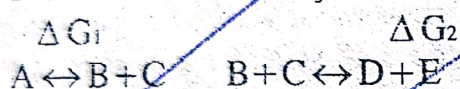


Fig.V.6

Transportorul C poate fi o ATP-ază iar conversia de la C la C' poate fi o schimbare în conformația enzimei. Mecanismul carrier poate explica $(Na^+, K^+)ATP$ -aza.

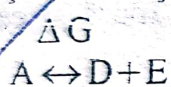
Bilanțul energetic pentru transportul activ exprimă faptul că reacțiile consumatoare de energie sunt cuplate cu cele furnizoare de energie astfel :

Fie următoarele reacții :



unde G este entalpia liberă

Condiția ca reacția



să aibă loc este ca :

$$\Delta G = \Delta G_1 + \Delta G_2 < 0$$

Pentru ca o ecuație să aibă loc cu o creștere a entalpiei libere sunt necesare două condiții :

a) existența unei alte reacții care să se desfășoare cu o variație negativă a energiei libere , dar mai mare în valoare absolută

b) cele două reacții să aibă intermediari comuni

O cuplare de astfel de reacții este prezentată schematic ca un angrenaj mecanic dat în Fig V.7. Cuplarea se realizează când $\Delta G < 0$

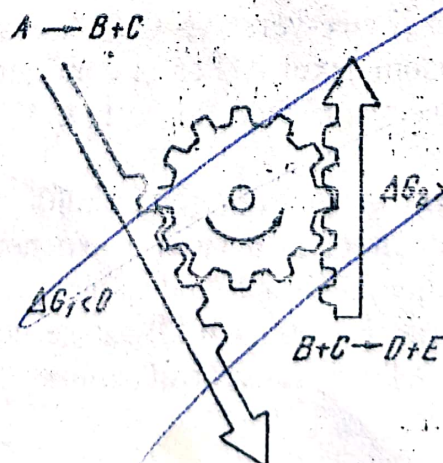


Fig.V.7

V.4.2. Pompa de Na și K

Pompa de Na și K reprezintă mecanismul de transport al ionilor de sodiu și potasiu mediat de o proteină numită $(Na^+, K^+)ATP$ -aza. Mecanismul molecular de funcționare $(Na^+, K^+)ATP$ -azei nu este pe deplin explicat, existând diferite modele. Vom prezenta în cele ce urmează modelul, descris de Skou pentru $(Na^+, K^+)ATP$ -aza sau pompa electrogenă de Na și K.

La nivel molecular, pompa de sodiu este un ansamblu de proteine care hidrolizează ATP-ul și utilizează energia pentru transferul antientropic al ionilor de sodiu și potasiu. ATP-aza de transport a Na și K este un ansamblu format din două subunități mai mari α (cu masa moleculară de cica 120.000D), care traversează membrana, între care se formează un canal de Na și două mai mici β (cu masa moleculară de cica 55000D) care crează două canale de K. (Fig. V.8)

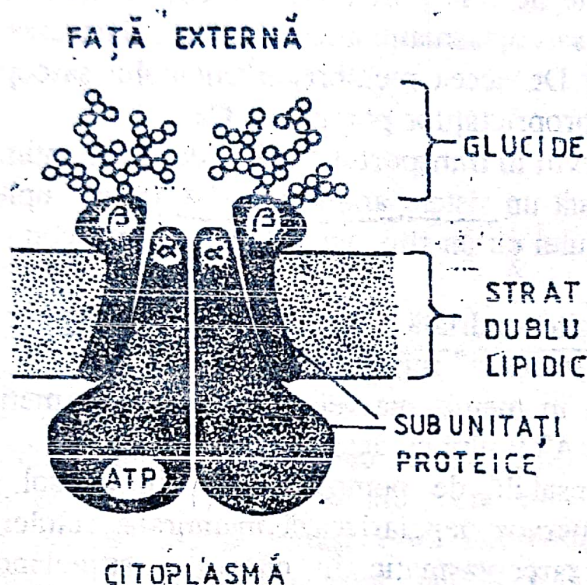
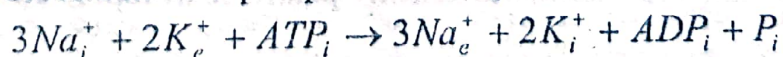


Fig. V.8

Subunitățile α prezintă 3 situsuri receptoare ale Na și un situs care fixează ATP-ul. Pe subunitățile β se găsesc 2 situsuri pentru K. Funcționarea pompei de Na și K poate fi descrisă după cum urmează: În citosol există un anumit număr de ioni de Na. Datorită agitației termice, ionii de Na din apropierea tetramerului (pe fața internă) determină o mișcare de vibrație care produce deschiderea canalului spre citosol. Aceasta permite ionilor de Na să ajungă la situsurile receptoare și să fie fixați. Concomitent se produce și o hidroliză a ATP-ului cu eliminarea de ADP în citoplasmă și menținerea pe subunitățile α a unui P anorganic. În urma hidrolizei ATP-ului rezultă energie ce asigură funcționarea pompei. În acest moment K din spațiu extracelular ajunge în apropierea celulelor existând posibilitatea ca doi ioni de K să se fixeze pe situsurile de K. Se produce apoi o defosforilare a subunităților α , fosforul abordând ADP-ul și resintetizând ATP-ul. Defosforilizarea unităților α produce o nouă mișcare de vibrație ce produce eliminarea ionilor de Na spre exterior.

Stoechiometria pompei de sodiu poate fi redată prin ecuația:



Aici indicii i și e se referă la compartimentul intern respectiv extern.

Pompa de sodiu intervine în nenumărate procese fiziologice din care amintim transportul aminoacizilor și al glucozei, în controlul eliberării neorotransmițătorilor în creier, etc. Pe de altă parte există o serie de factori fiziologici care influențează $(\text{Na}^+, \text{K}^+)\text{ATP-aza}$. De exemplu viteza maximă de translocare depinde de numărul de unități transportoare care este determinat ereditar. De asemenea, activitatea pompei depinde de gradul de maturare al țesutului. Fluiditatea membranei afectează și ea activitatea pompei.

V.4.3. Pompa de calciu

Concentrația de Ca^{2+} liber în citoplasmă este foarte redusă în raport cu cea din mediul extracelular. Pentru a se explica menținerea acestei diferențe de concentrație au fost studiate mai multe mecanisme de transport activ. Se cunosc mai multe lucruri despre pompa de Ca din reticulul sarcoplasmatic al celulei musculare care servește ca loc de păstrare al Ca intracelular. De aceea membrana reticulului sarcoplasmatic se folosește ca model pentru studiul proprietăților pompei de Ca.

Dintre mecanismele ce intervin în transportul ionilor de Ca amintim :

1) la nivelul membranei există un sistem antiport $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ ce cuplează difuzia facilitată de Na spre interiorul celulei cu un flux activ de Ca în sens contrar printr-un mecanism de transport secundar.

2) în membrana internă mitocondrială există un sistem uniport de Ca^{2+} , producând acumularea acestuia în interiorul mitocondrii

3) există o $(\text{Ca}^{2+})\text{ATP-ază}$ în membrana reticulului sarcoplasmatic al celulei musculare care cuplează hidroliza ATP-ului cu acumularea de Ca^{2+} .

Pompa de Ca este responsabilă de pomparea Ca din citosol în reticulul sarcoplasmatic. Când un impuls nervos depolarizează membrana celulei musculare, este eliberat Ca din reticulul sarcoplasmatic în citosol, stimulând contracția musculară. Pompa de Ca este o $(\text{Ca}^{2+})\text{ATP-ază}$ care este fosforilată și defosforilată în timpul unui ciclu al pompei. $(\text{Ca}^{2+})\text{ATP-aza}$ este de altfel cea mai mare proteină din membrana reticulului sarcoplasmatic fiind constituită dintr-un singur lanț polipeptid cu greutate moleculară de 115.000D. Ea cuplează hidroliza unei molecule de ATP în citoplasmă cu transportul a doi ioni Ca^{2+} din citoplasmă în exterior.

Eritrocitele de la om prezintă o puternică pompă de Ca ce asigură expulzarea ionului printr-un mecanism comparabil cu alte celule. Aici Ca intracelular este dependent de compoziția lipidică a membranei eritrocitare și este implicat în menținerea formei eritrocitului. Funcționarea pompei de Ca intervine în mecanismul de maturare a hematiei umane. Conținutul în Ca în interiorul eritrocitelor este mic datorită permeabilității reduse a membranei pentru acest ion și datorită pompei de Ca ce transportă activ Ca în spațiul extracelular. Pompa de Ca este dependentă de prezența ionilor de Mg liberi și de pH. $(\text{Ca}^{2+})\text{ATP-aza}$ prezintă două situsuri de legare pentru ATP, cu afinitate foarte diferită. Proteina pompă este fosforilată rapid și mai intens decât pompa de Na. Există de asemenea o legătură între transportul de K și conținutul în ioni de Ca, fenomen cunoscut drept "efect Gardos". Mecanismul permeabilității induse de Ca (care este foarte selectiv pentru K în raport cu Na), este

încă necunoscut. Adăugăm aici că ionii de Ca sunt implicați în reglarea formei și deformabilității celulei și că acționează ca mesageri intracelulari.

V.5. Echilibrul osmotic

Echilibrul osmotic se realizează în cazul membranei semipermeabile, deși se menține un gradient de concentrație între interiorul celulei și exteriorul acesteia.

Să considerăm o membrană semipermeabilă ce separă două compartimente, unul conținând solventul S iar cel de-al doilea ce conține substanța A dizolvată în solventul S. Dacă membrana este semipermeabilă, (după cum am arătat la studiul fluidelor), numai solventul poate trece dintr-un compartiment în celălalt. Acestei mișcări însă, i se opune o presiune din mediul al doilea astfel încât se poate ajunge la echilibru (Fig. V.9).

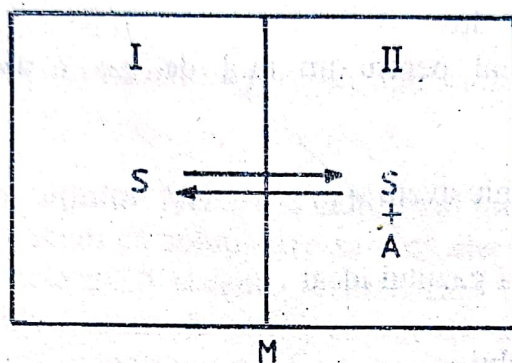


Fig. V.9

Echilibrul termodinamic poate fi descris în cazul acesta cu ajutorul potențialelor termodinamice. Dintre acestea, se alege entalpia liberă întrucât procesele chimice din organismele vii au loc la temperatură constantă și la presiune constantă. Astfel variația entalpiei libere la trecerea unui mol de solvent din compartimentul I în compartimentul II este

$$\Delta G = \mu_S^{\text{II}} - \mu_S^{\text{I}} \quad (\text{V.1})$$

Condiția de echilibru se scrie :

$$\Delta G = 0 \quad (\text{V.2})$$

Expresia (V.1) a fost obținută pornind de la definiția potențialului chimic.

Amintim aici că entalpia liberă a fost definită în capitolul anterior ca :

$$G = U - TS + pV$$

Iar dacă se consideră și "lucrul" chimic

$$dG = SdT + Vdp + \sum \mu_i dn_i \quad (\text{V.3})$$

Aici μ_i este potențialul chimic iar dn_i este variația numărului de componenți chimici

Dacă se menține constantă temperatura și presiunea, potențialul chimic se poate defini ca fiind :

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_{j \neq i}} \quad (\text{V.4})$$

deci este variația entalpiei libere care se realizează la variația unui component chimic, menținând temperatura, presiunea și suma componenților constante.

Pentru un sistem cu mai mulți componenți, se poate demonstra că la o temperatură și presiune dată, potențialul Gibbs este :

$$G = \sum n_i \mu_i \quad (V.5)$$

Deci potențialul chimic este entalpia liberă molară când concentrația componentului i este exprimat în moli.

Expresia potențialului chimic se poate determina pentru soluții foarte puțin concentrate pentru care se poate considera modelul gazului ideal. La destinderea gazului ideal, acesta efectuează lucrul mecanic elementar :

$$dL = p dV \quad (V.6)$$

Acest lucru mecanic se realizează consumându-se energie chimică, deci

$$dL = - d\mu \quad (V.7)$$

Aici am considerat un mol de gaz ideal (considerând concentrația n_i constantă și am diferențiat (V.5) astfel că $dG = d\mu$)

Diferențiind legea gazului ideal pentru un mol de gaz ($pV = RT$) aflat la temperatură constantă, se obține :

$$p dV + V dp = 0$$

și atunci pentru potențialul chimic avem :

$$d\mu = V dp \quad (V.8)$$

sau eliminând volumul din legea gazului ideal ,

$$d\mu = RT dp/p$$

Integrând ultima expresie , se obține :

$$\mu = \mu^0 + RT \ln p/p^0 \quad (V.9)$$

Dacă se folosește fracția molară definită prin :

$$x_i = n_i / \sum n_i \quad (V.10)$$

și se consideră că pentru solventul pur fracția molară are valoarea 1, iar presiunea exercitată de gaz, conform teoriei cinetice a gazului ideal este proporțională cu numărul de particule din unitatea de volum ($p = knT$), potențialul chimic al solventului din soluție va fi.

$$\mu_s = \mu_s^0 + RT \ln x_s \quad (V.11)$$

Dar din (V.8) prin integrare, se obține :

$$\mu_s^{0 II} - \mu_s^{0 I} = V_{\mu, s} (p^{II} - p^I) \quad (V.12)$$

unde $V_{\mu, s}$ este volumul molar al solventului.

Dar ($p^{II} - p^I$) este tocmai presiunea osmotică, și atunci :

$$\pi = (p^{\text{II}} - p^{\text{I}}) = - \frac{RT}{V} \ln x_s \quad (\text{V.13})$$

Dacă se notează cu

$$X_s = n_A / n_s + n_A$$

atunci

$$X_s = 1 - X_A \text{ și}$$

$$n_A / n_s = V_s c_A$$

Dezvoltând în serie de puteri, se obține :

$$\ln X_s^{\text{II}} = \ln (1 - X_A) = - X_A - X_A^2 / 2 + \dots, \quad (\text{V.14})$$

~~Păstrind numai primii termeni ai dezvoltării, în final se obține :~~

$$\pi = RTC_A \quad (\text{V.15})$$

care este formula Van't Hoff.

Facem din nou observația că aceste formule sunt valabile pentru gaze ideale și pentru soluții ideale.

V.6. Potențialul Nernst și echilibrul ionic.

Să considerăm acum că soluția are sarcină electrică. Dacă vom considera ca și mai înainte, că între cele două sisteme se realizează un schimb de ioni. (fie ei de un singur tip, de exemplu cationi). la echilibru variația entalpiei libere când un mol din astfel de ioni trece din compartimentul I în compartimentul II, va fi nulă, adică,

$$\Delta G = \mu_c^{\text{II}} - \mu_c^{\text{I}} = 0$$

În această relație μ_c este potențialul electrochimic ce constă din potențialul chimic și dintr-un potențial electric $z F V$, V fiind potențialul electric, z sarcina electrică iar F numărul lui Faraday. Atunci condiția de echilibru, folosind concentrația cationilor C_c , se scrie :

$$\mu_c^{\text{OI}} + RT \ln C_c^{\text{I}} + z_c F V^{\text{I}} = \mu_c^{\text{OII}} + RT \ln C_c^{\text{II}} + z_c F V^{\text{II}} \quad (\text{V.16})$$

adică pentru diferența de potențial se găsește :

$$V^{\text{II}} - V^{\text{I}} = \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_c^{\text{II}}}{C_c^{\text{I}}} \quad \text{— ecuația lui Nernst} \quad (\text{V.17})$$

Aceasta este ecuația lui Nernst.

Deci diferența de potențial electric ce apare datorită transportului sarcinilor încărcate este proporțională cu logaritmul raportului concentrațiilor de cationi din cele două compartimente. Pentru cationi sarcina este pozitivă ($z > 0$), deci potențialul este mai mare în partea mai diluată. Deci echilibrul are loc datorită apariției unui potențial în partea mai diluată a soluției, care crește potențialul electrochimic al soluției în acest compartiment, în raport cu cel care are soluția mai concentrată. Potențialul se numește potențial de difuzie datorită faptului că apare

datorită difuziei ionilor prin membrana celulară. Pentru anioni lucrurile se petrec exact invers.

V.7. Echilibrul Donnan

Se poate stabili un echilibru ionic și atunci când membrana este străbătută de ambele tipuri de ioni. Acest lucru este posibil atunci când unul dintre compartimente conține, pe lângă particulele pentru care membrana este permeabilă, o moleculă mare, cum ar fi o proteină. Să considerăm că această proteină, de sarcină z_p și de concentrație C_p este conținută în cel de al doilea compartiment (Fig. V.10)

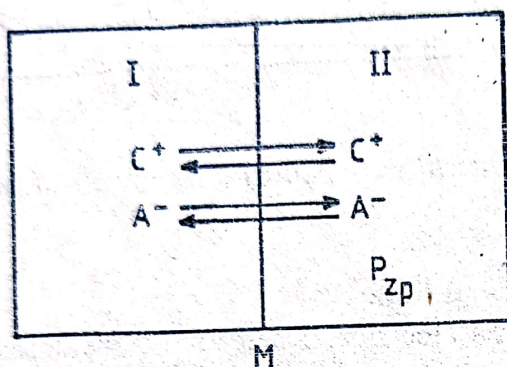


Fig. V.10

Să considerăm în plus că există o presiune osmotică adecvată astfel încât potențialul chimic să fie același în ambele compartimente, deci :

$$\mu_{CA}^I = \mu_{CA}^{II}$$

După (V.16) obținem :

$$\mu_{CA}^{II} + RT \ln C_C^I C_A^I = \mu_{CA}^{III} + RT \ln C_C^{II} C_A^{II} \quad (V.18)$$

Dacă se neglijează efectele diferenței de presiune pentru potențialele de zero avem

$$\mu_{CA}^{II} = \mu_{CA}^{III} \quad (V.19)$$

deci

$$C_C^{II} C_A^{II} = C_C^I C_A^I \quad (V.20)$$

Raportul

$$C_C^I / C_C^{II} = (C_A^I / C_A^{II})^{\frac{1}{z_p}} = r \quad (V.21)$$

— raport Donnan

se numește raport Donnan.

Dar în fiecare compartiment soluția trebuie să fie neutră din punct de vedere electric, deci în compartimentul I trebuie : ca

$$C_C^I = C_A^I$$

Iar pentru compartimentul al doilea

$$C_C^{II} = C_A^{II} - z_p C_p$$

Atunci

$$r^2 = (C_c^I / C_c^{II})^2 = C_c^I C_A^I / (C_c^{II})^2 = C_c^I C_A^I / (C_A^{II} - z_p C_p) C_c^{II}$$

Dar după definiția raportului Donann obținem :

$$r^2 = C_A^{II} / (C_A^{II} - z_p C_p) \quad (V.22)$$

Această ecuație arată că, în cazul în care sarcina proteinei este negativă, $r^2 < 1$, $r < 1$, deci

$$C_A^{II} < C_A^I \text{ și } C_c^I < C_c^{II} \quad (V.23)$$

Ecuația lui Nernst se scrie atunci :

$$V^{II} - V^I = \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_A^{II}}{C_A^I} = \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_c^I}{C_c^{II}} \quad (V.24)$$

care este negativ atunci când sarcina electrică a proteinei este negativă și pozitiv când sarcina acesteia este pozitivă. Acest potențial se mai poate scrie cu ajutorul raportului Donann sub forma restrînsă :

$$V^{II} - V^I = \frac{RT}{zF} \ln r \quad (V.25)$$

În cazul în care membrana este permeabilă pentru o varietate de ioni, neutralitatea electrică impune ca diferența de potențial să aibă valoarea :

$$\Delta V = \frac{RT}{F} \frac{\sum_{k=1}^n z_k p_k A C_k}{\sum_{k=1}^n z_k^2 p_k C_k} \quad (V.26)$$

În (V.26) z_k sunt sarcinile electrice, p_k sunt permeabilitățile membranei pentru diferitele tipuri de ioni iar C_k sunt concentrațiile acestora.

CAPITOLUL VI. FENOMENE BIOELECTRICE

Prezența în citoplasma oricărei celule cît și în fluidele extracelulare, a atomilor și moleculelor ionizate și faptul că activitatea metabolică menține diferența de concentrație a acestor ioni, face ca fenomenele electrice să fie proprii tuturor celulelor vegetale și animale.

VI.1. Potentialul de repaos celular

O caracteristică importantă a oricărei celule vii este existența unei diferențe de potențial electric între fața externă și cea internă a membranei celulare. Deoarece atât citoplasma cât și fluidele interstițiale au conductivitate ridicată, în interiorul lor potențialul este constant, deci potențialul de repaos celular (PR) este diferența de potențial dintre interiorul celulei și mediul extern, spre deosebire de potențialul activ din timpul activității celulelor excitabile.

Măsurarea acestor potențiale a fost posibilă odată cu dezvoltarea tehnicii microelectrozilor de sticlă. Aceștia sunt pipete (micropipete cu vârful de $0,5 \mu\text{m}$) care nu produc leziuni membranei la străpungere ei. Între microelectrodul de sticlă din citoplasmă și un electrod de calomel de exemplu, plasat în soluția externă, apare o diferență de potențial, interiorul celulei fiind întotdeauna negativ față de exterior. Potențialul de repaos are valori bine determinate pentru fiecare celulă, variind între -50V și -100mV (Fig. VI.1)

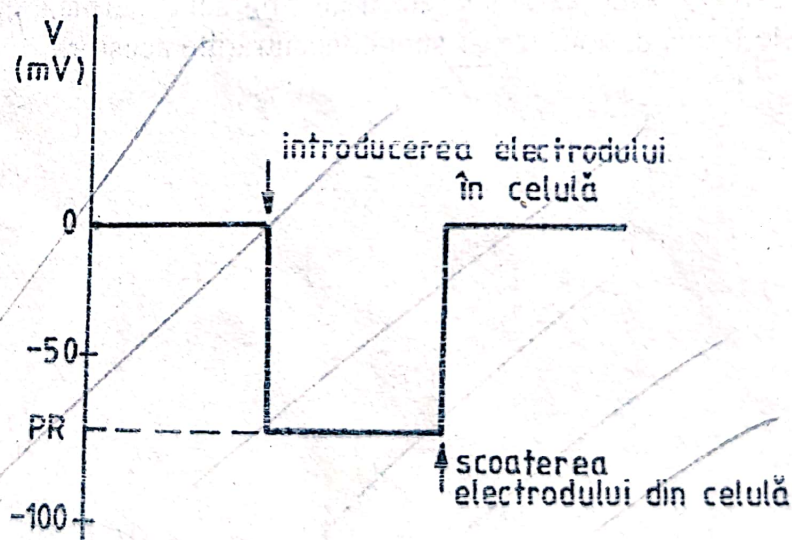


Fig. VI.1

Între PR și metabolismul general există o legătură evidentă (de exemplu lipsa de oxigen sau scăderea temperaturii pot reduce PR pînă la valoarea 0). Această legătură se realizează prin intermediul menținerii (în cadrul

metabolismului) a compoziției ionice diferite a citoplasmei față de lichidul extracelular. PR este expresia electrică a acestei asimetrii. Astfel, potasiul este de 30 de ori mai concentrat în interior iar sodiul și clorul de aproximativ 10 ori în exterior.

S-a considerat ca PR este potențialul de echilibru electrochimic între interior și exterior pentru ionul de K^+ care, după legea lui Nernst este :

$$V_K = \frac{RT}{F} \ln \frac{c_K^e}{c_K^i} \quad (VI.1)$$

unde V_K este potențialul de repaos, c_K^e este concentrația de potasiu în exteriorul celulei iar c_K^i este concentrația de potasiu în interiorul celulei.

Deoarece, după cum am afirmat mai sus, concentrația de potasiu este mai mare în interiorul celulei, deoarece membrana celulară este permeabilă în special pentru potasiu, potențialul de repaos este negativ. Na rămâne mult mai abundent în spațiul extracelular decât în citoplasmă deși gradientul de concentrație tinde să-l introducă în interior. Cercetările au arătat că Na intră în celulă, dar concentrația sa rămâne constantă datorită unui proces de scoatere în afară, împotriva gradientului de concentrație și de potențial, care este rezultatul unui proces de transport activ. Pentru acest transport este necesară, după cum am arătat, energie metabolică. Deci prin membrana au loc în permanență fluxuri pasive de ioni, compensate de fluxuri de sens contrar ce se desfășoară cu consum de energie metabolică.

Potențialul electric transmembranar, curenții electrici dați de fluxurile ionice pot fi descrise cu ajutorul circuitului electric echivalent al membranei.

VI.1.1. Schema electrică echivalentă a membranei celulare

Schema electrică echivalentă a membranei celulare neexcitabile este dată în Fig.VI.2.

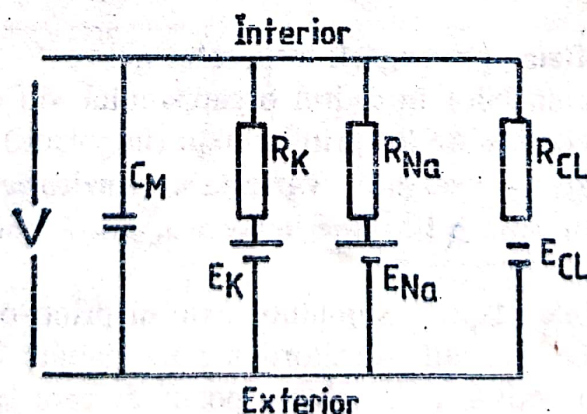


Fig. VI.2

În Fig.VI.2 C_M este capacitatea electrică a membranei, deci membrana celulară se comportă ca un dielectric (membrana este un condensator cu

capacitatea electrică de $1 \mu F$) iar E_K , E_{Na} , E_{Cl} , sunt potențialele de echilibru electrochimic ale fiecăruia dintre ioni.

Aplicînd legea lui Ohm, obținem:

$$V = IR_{\lambda}' \quad (VI.2)$$

unde rezistența totală a circuitului este dată de:

$$\frac{1}{R_{\lambda}'} = \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_{Na}} + \frac{1}{R_{Cl}} \quad (VI.3)$$

rezistențele fiind legate în paralel, iar intensitatea curentului total debitat de baterie este:

$$I = \frac{E_K}{R_K} + \frac{E_{Na}}{R_{Na}} + \frac{E_{Cl}}{R_{Cl}} \quad (VI.4)$$

Dacă se folosesc conductanțele,

$$g_i = \frac{1}{R_i} \quad (VI.5)$$

împreună cu relația (VI.4), expresia (VI.2) devine:

$$V = \frac{g_K E_K + g_{Na} E_{Na} + g_{Cl} E_{Cl}}{g_K + g_{Na} + g_{Cl}} \quad (VI.6)$$

Formula (VI.6) dă mai bine, decît relația lui Nernst, valorile potențialului celular de repaos. Potențialul dat de (VI.6) tinde la potențialul de echilibru electrochimic E_i al acelui ion, cînd conductanța membranei pentru acel ion este mult mai mare decît pentru ceilalți.

VI.2. Biofizica propagării influxului nervos

Transmiterea semnalelor în cadrul organismului viu este un fenomen de natură bioelectrică și aceasta are loc prin influxul (impulsul) nervos.

Influxul nervos reprezintă variația tranzitorie și probabilă a potențialului de membrană a fibrelor nervoase, adică potențialul de acțiune produs de un stimul.

Celulele excitabile răspund stimulilor externi printr-o degajare bruscă de energie sub forma unei variații tranzitorii a potențialului de membrană de la valoarea de repaos, negativă, la o valoare pozitivă, care se transmite pe toată suprafața membranei celulare. Reprezentantul tipic al celulei excitabile este neuronul. Stimulii pot fi mecanici, termici, electrici, luminoși.

Cînd un stimul acționează asupra neuronului, se produce o variație locală a potențialului transmembranar, amplitudinea acestei variații fiind proporțională liniar sau logaritmic cu mărimea stimulului. Potențialele locale se propagă pe

suprafața membranelor excitabile datorită proprietăților electrice pasive ale membranei, propagarea făcându-se ca în mișcarea amortizată. (amplitudinea scade exponențial cu distanța de la locul de origine al potențialului). În Fig. VI.3 se prezintă variația potențialului produsă de un semnal electric rectangular.

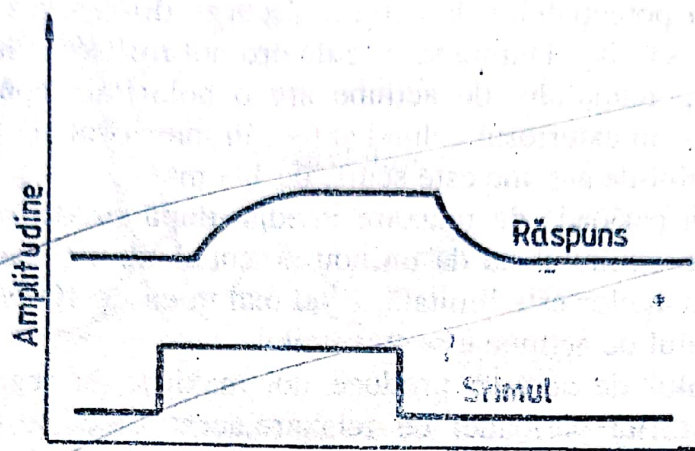


Fig. VI.3

Dacă însă depolarizarea depășește o anumită valoare, denumită “valoare de prag”, atunci se declanșează “potențialul de vârf” sau “spike” al fibrei nervoase care este un răspuns activ al acestuia la stimulul care l-a produs. În Fig. VI.4 sunt prezentate un potențial local și un potențial de acțiune.

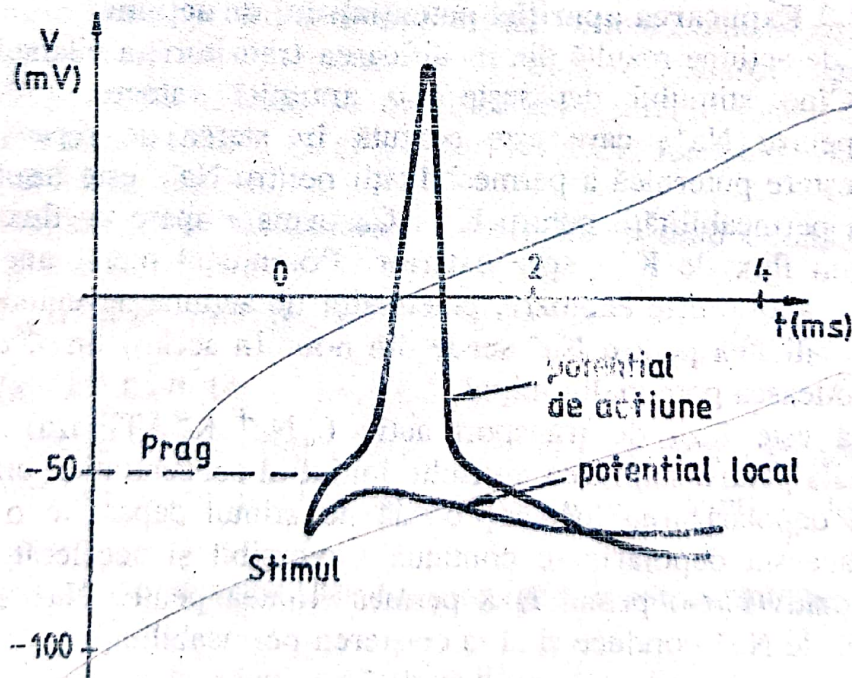


Fig. VI.4

VI.2.1. Proprietățile potențialului de acțiune

Potențialul de acțiune are următoarele proprietăți :

- 1) Potențialul de acțiune prezintă un maxim (spike) de amplitudine a cărei valoare nu depinde de amplitudinea stimulului. El are o valoare tipică de 30 mV și apare când stimulul atinge o valoare mai mare decât valoarea "de prag".
- 2) Apariția potențialului de acțiune decurge după legea codului binar (on sau off, adică 1 sau 0). Durata sa este de ordinul milisecundelor.
- 3) Vârful potențialului de acțiune are o polaritate opusă potențialului de repaos, el este (-) în exteriorul celulei și (+) în interiorul ei.
- 4) Potențialul de acțiune este scurt, de 1-3 ms
- 5) Există o perioadă de relaxare imediat după producerea maximului, de circa 1ms în care stimulul nu dă un nou potențial de acțiune astfel că frecvența de apariție a maximelor este limitată, fiind mai mică de 1000/s.
- 6) Potențialul de acțiune este ireversibil
- 7) Potențialul de acțiune produce noi maxime în regiunile adiacente ale membranei. Datorită perioadei de relaxare, acest efect se propagă în ambele direcții, din punctul stimulului, ca o undă de șoc. Pentru potențialul de acțiune nu există o atenuare a unde când acesta se deplasează de-a lungul membranei.
- 8) Propagarea potențialului de acțiune (PA) este regenerativă; în scurt timp după ce membrana transmite un PA, aceasta se reface și devine aptă pentru o nouă transmisie. Această caracteristică permite deplasarea PA la distanțe mari, în felul acesta apărând influxul nervos.
- 9) Constituie unitatea de bază a transmiterii informației pe fibra nervoasă

VI.2.2 Explicarea apariției potențialului de acțiune

Potențialul de acțiune rezultă din modificarea tranzitorie a bilanțului ionic în membrană. Când stimulul depășește o anumită valoare, (50-55mV), permeabilitatea pentru Na^+ , care este scăzută în starea de repaos, crește brusc. Această creștere puternică a permeabilității pentru Na^+ este însoțită de o creștere ușoară a permeabilității pentru K^+ . Ca urmare apare un flux de Na^+ spre interior și un flux de K^+ spre exterior. Potențialul membranei devine pozitiv în interior, apoi crește exploziv, potențialul de acțiune devenind maxim, după care permeabilitatea pentru Na^+ scade din nou. În același timp, circulația K^+ tinde să restabilească potențialul inițial.

Faza finală este faza de transport activ (Na^+ , K^+ ATP-aza) care are contribuție esențială pentru stabilirea nivelului inițial al concentrației ionilor (Fig. VI.5) Deci dacă depolarizarea locală produsă de stimul depășește o anumită valoare, atunci această depolarizare continuă ireversibil și accelerat, datorită unui feedback pozitiv (într-o primă fază permeabilitatea pentru Na^+ crește iar transportul ionilor de Na^+ conduce și el la creșterea permeabilității).

De aceea, polarizarea locală, nu numai că se anulează ci devine pozitivă. Intervenția unui alt proces, guvernat de un feedback negativ (în faza a doua crește permeabilitatea pentru K^+ și scade față de ionii de Na^+) face ca valoarea potențialului să scadă spre valoarea de repaos.

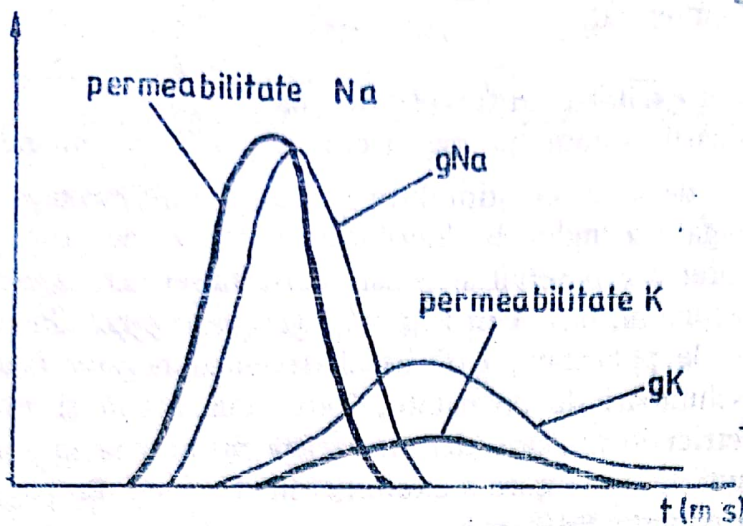


Fig. VI.5

În timpul acestui proces, membrana este refractară la noi stimuli.

Curentul de Na^+ inițial, produce o dislocație de sarcină în regiunile adiacente, cauzând o creștere a permeabilității pentru Na^+ astfel că procesul se extinde în părți adiacente membranei și potențialul de acțiune se propagă ca o undă mai departe de punctul în care a acționat stimulul. Această variație a potențialului transmembranar se propagă ~~redusă~~ cu viteze mari pînă la distanțe mari de locul stimulului. Natura procesului regenerativ prin care o depolarizare a membranei este amplificată, a fost explicată de A.L. Hodgkin și A.G. Huxley care au arătat cum se modifică conductanța membranei în timpul excitației și, implicit, cum se modifică deci curenții ionici. În cazul schemei echivalente a membranei, g_K și g_{Na} sunt variabile, funcție de valoarea instantanee a potențialului de acțiune.

Hodgkin și Huxley au arătat că evoluția în timp a conductanțelor poate fi exprimată sub forma :

$$\begin{aligned} g_{Na}(t) &= g_{Na}^0 m^3(t) h(t) \\ g_K(t) &= g_K^0 n^4(t) \end{aligned} \quad (\text{VI.7})$$

În aceste formule $m(t)$, $h(t)$, $n(t)$ sunt niște parametri adimensionali ce au valori cuprinse între 0 și 1 iar g_{Na}^0 și g_K^0 sunt valorile maxime ale conductanțelor.

Cu valorile conductanțelor date mai sus, pentru potențialul electric al membranei se obține :

$$E_m = \frac{\sum g_i E_i}{\sum g_i} \quad (\text{VI.8})$$

care corespund tocmai permeabilităților din Fig VI.6

Acest model a fost verificat experimental cu miocroelectrozi, măsurându-se fluxurile de ioni cu ajutorul izotopilor de Na și K. Rezultatele experimentale au fost în bună concordanță cu teoria.

VI.3. Propagarea excitației în fibrele nervoase

Între momentul aplicării stimulului pe fibra nervoasă și momentul detectării PA la o distanță l de locul de stimulare se scurge un timp $t = l/v$ unde v este viteza de propagare a undei de depolarizare. Viteza de propagare depinde atât de diametrul fibrei nervoase cât și de structura fibrei nervoase (dacă fibra este mielinizată sau nemielinizată). Din Fig. VI.4 se observă că, în cazul PA se produce o inversare de polaritate, exteriorul devenind negativ față de interior. Datorită acestor schimbări de polaritate, între zona activă și zonele învecinate apar curenți electrici locali care depolarizează membrana în zonele adiacente, acționând ca stimuli de declanșare a excitației în alte zone. ~~Propagarea PA se face cu viteze de aproximativ 1-100 m/s.~~

În fibrele nemielinizate influxul nervos se propagă în mod recurent, adică din aproape în aproape, așa în Fig. VI.6.

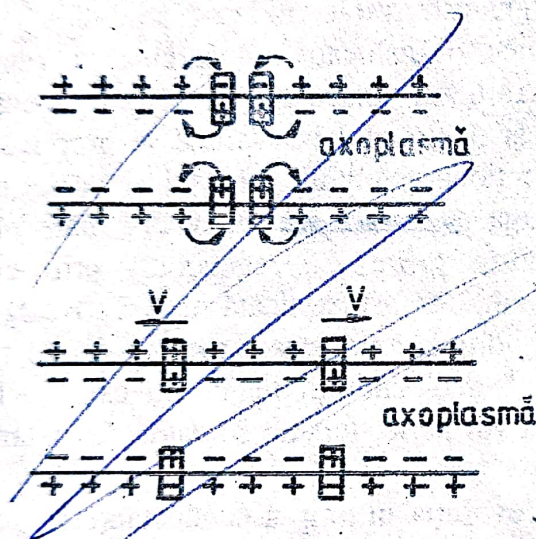


Fig. VI.6

Depolarizarea membranei generează curenți ionici longitudinali, care se propagă din aproape în aproape cu viteze relativ mici. Viteza de propagare a influxului nervos în fibrele nemielinizate este, de exemplu, la pisică de circa 0.7-2.3 m/s. Acești curenți se numesc curenți Hermann. Mielina izolează axonul de lichidul extracelular, contactul fiind numai în nodurile Ranvier, unde teaca se îngustează. Mielina acționează ca izolator electric, deci curenții nu pot traversa membrana. Curenții nu mai traversează toată membrana, ci "sar" de la un nod Ranvier la altul, închizându-se prin axoplasmă și lichidul extracelular. Acești curenți se numesc curenți Stampfli (Fig. VI.7) și se deplasează cu viteze de circa 10-100 m/s.

Dovada acestei propagări o constituie faptul că narcotizarea locală a internodului, nu blochează propagarea PA, pe când cea a nodurilor, o blochează.

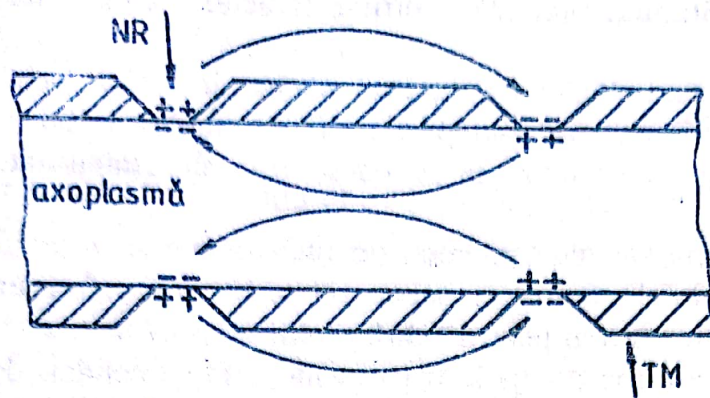


Fig. VI.7

Observație.

Un fenomen important este acomodarea, adică creșterea pragului de excitabilitate a fibrelor nervoase atunci când asupra lor acționează un stimul de durată. În acest caz stimulii dau naștere la o succesiune de potențiale de vîrf (Fig. VI.8)

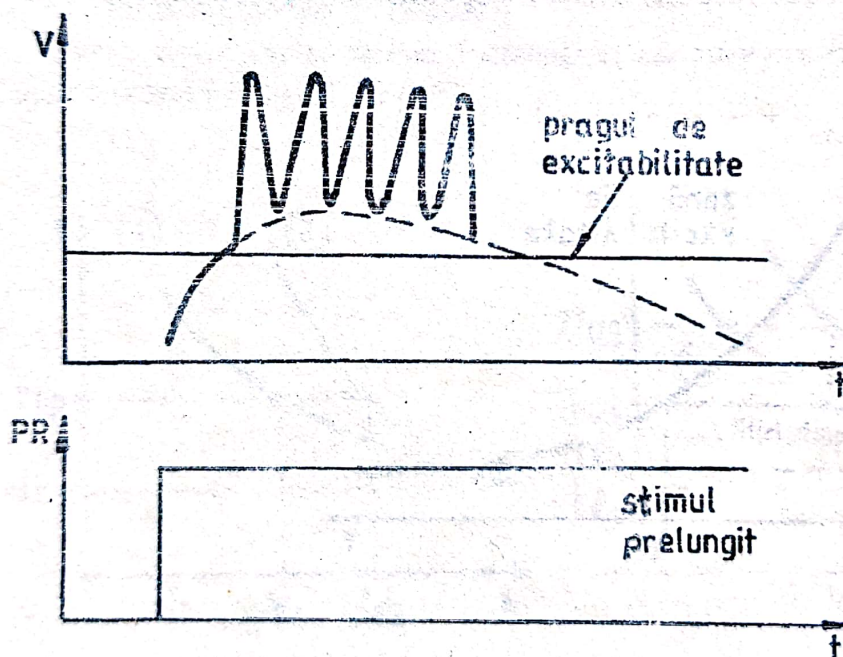


Fig. VI.8

VI.4. Concluzii.

Excitația reprezintă inducerea unei zone de depolarizare pe axon

Infiuxul nervos reprezintă propagarea zonei de depolarizare de-a lungul structurii excitabile S-au găsit membrane excitabile și în alte celule, de exemplu, la unele alge.

VI.5. Parametrii sistemelor excitabile

Factorii fizico- chimici care induc modificări ale parametrilor sistemelor excitabile se numesc stimuli. Stimulii prezintă anumite caracteristici : tărie, amplitudine, durată, pantă, etc.

Organele receptoare sunt dotate cu sisteme excitabile astfel încât să producă modificări decelabile. Pentru aceasta parametrii stimulilor trebuie să îndeplinească anumite condiții minimale în ceea ce privește intensitatea, panta, etc.

Astfel stimulii electromagnetici cu lungimea de undă cuprinsă între 400-760 nm (lumina) pot excita celulele fotoreceptoare, cei mecanici (cu frecvență cuprinsă între 16-20.000 Hz) sunt stimuli pentru celulele din urechea internă.

Pentru toți acești stimuli are loc o depolarizare a membranei celulei, deci se produce un fenomen electric. Acesta este motivul pentru care pentru cercetări se folosesc stimulii electrice. După intensitate stimulii pot fi sublimari (slabi), care nu produc modificări detectabile și supraliniari care produc excitarea sistemului.

În ceea ce privește panta (bruschețea), se observă că stimulii care se "instalează" lent nu provoacă excitația, chiar dacă limita lor crește foarte mult, datorită fenomenelor de acomodare; există o pantă limită de la care începe excitația. După durată, stimulii pot fi scurți (când nu produc excitația) și lungi.

Între intensitatea liminară (care produce excitația) și durata stimulilor dreptunghiulari care provoacă răspuns există o dependentă hiperbolică (Fig. VI.9)

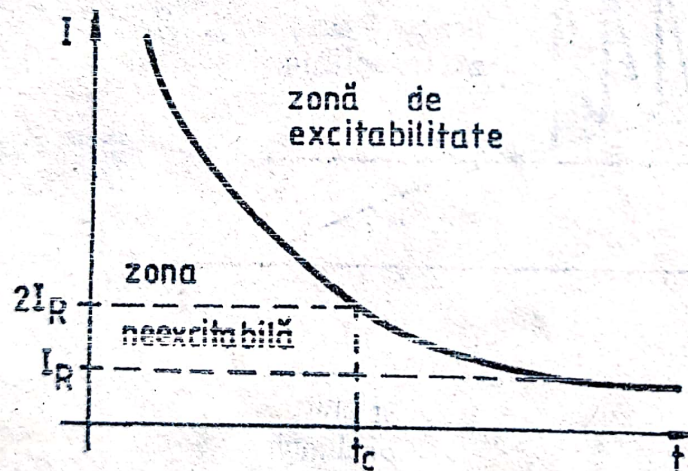


Fig. VI.9

(VI.9)

$$i = \frac{a}{t} + b$$

În formula (VI.9) a și b sunt constante ce caracterizează sistemele excitabile. Parametrii excitabilității sunt reobaza și cronaxia.

Reobaza (I_R) este intensitatea minimă a unui stimul cu durată infinită (practic mai mare decât a timpului util) care provoacă un răspuns.

Dacă în formula (VI.9) considerăm $t = \infty$, obținem :

$$I = I_R = b \quad (\text{VI.10})$$

Atunci expresia (VI.9) se scrie :

$$I = \frac{a}{t} + I_R \quad (\text{VI.11})$$

Cronaxia este timpul (t_c) al unui semnal dreptunghiular liminar cu intensitatea egală cu dublul reobazei care induce un răspuns minim din partea sistemului excitabil.

Dacă în (VI.11) considerăm

$$I = 2I_R$$

se obține :

$$a = t_c I_R \quad (\text{VI.12})$$

Din (VI.11) și (VI.12) rezultă legea Weiss-Lapicque :

$$I = I_R \left(1 + \frac{t_c}{t} \right) \quad (\text{VI.13})$$

Doi nervi cu aceeași reobază pot avea cronaxii diferite; cel care are cronaxia mai mică este mai excitabil.

Invers, doi nervi cu aceeași cronaxie, cel care are reobaza mai mică este mai ușor excitabil. (Fig. VI.10 a, b)

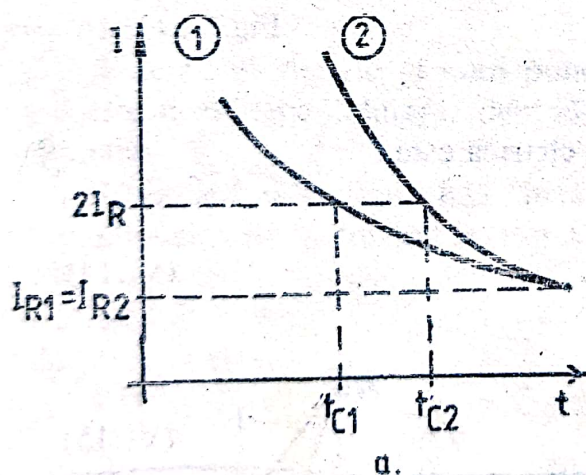


Fig. VI.10a

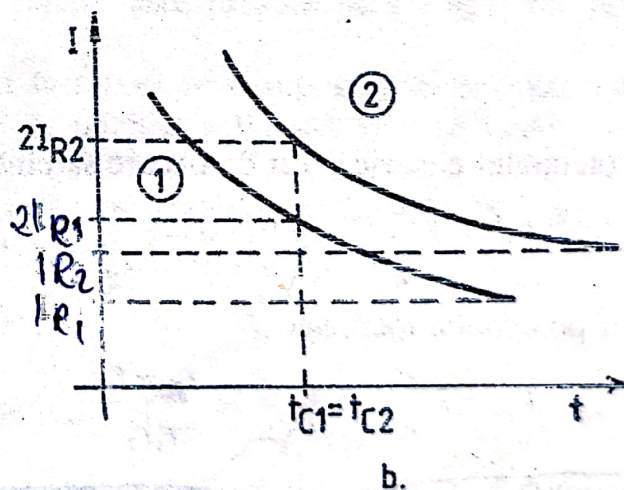


Fig. VI.10b

VI.6. Bioelectrogeneza țesuturilor și organelor

Activitatea electrică a țesuturilor și organelor ~~de~~ datorază activității electrice a celulelor ce intră în componența lor. Ea se analizează prin măsurarea biopotențialelor care sunt rezultatul sumei vectoriale a biopotențialelor celulare.

Nervii excitați produc potențiale de acțiune care rezultă din însumarea potențialelor de acțiune a fiecărei fibre ne voase. Studiul activității bioelectrice a

inimii arată că ea este un organ autoexcitabil. Inima este organul care-și creează singur stimulul pentru fiecare contracție. Contracția inimii este însoțită de producerea potențialului de acțiune. Înregistrarea potențialului de acțiune se face cu ajutorul a doi electrozi de calomel (nepolarizabili), obținându-se electrocardiograma.

Din punct de vedere electric inima este o sursă de tensiune electromotoare variabilă în timp sau un dipol electric mobil, aflat într-un mediu conductor.

VI.6.1. Potențialul electric al unui dipol

Un dipol electric reprezintă un ansamblu de două sarcini electrice de semn opus, situate la o anumită distanță una de cealaltă. Să considerăm un dipol aflat într-un mediu conductor, cele două sarcini fiind la distanța $2a$, și un punct P depărtat de dipol. Să calculăm potențialul electric în punctul P în raport cu acest dipol electric. (Fig. VI.11)

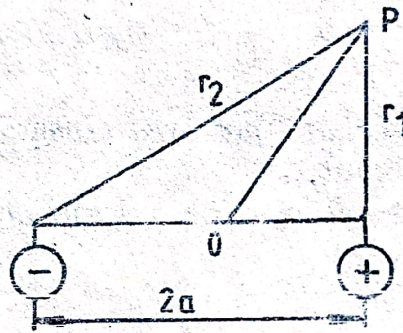


Fig. VI.11

Potențialul electric creat de fiecare sarcină electrică este :

$$V_P^+ = k \frac{e}{r_1} \quad V_P^- = -k \frac{e}{r_2} \quad (\text{VI.14})$$

iar potențialul total este :

$$V_P = k \frac{e}{r_1} - k \frac{e}{r_2} = ke \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} \quad (\text{VI.15})$$

Amplificând relația (VI.15) cu mărimea $r_1 + r_2$, se obține :

$$V_P = ke \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_1 r_2 (r_1 + r_2)} \quad (\text{VI.16})$$

Aplicând teorema cosinusului, pentru distanțele din Fig. VI.10 rezultă :

$$\begin{aligned} r_1^2 &= r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta \\ r_2^2 &= r^2 + a^2 + 2ar \cos \theta \end{aligned} \quad (\text{VI.17})$$

Introducând (VI.17) în (VI.16) se obține :

$$V_p = ke \frac{4ar \cos \theta}{r_1 r_2 (r_1 + r_2)} \quad (\text{VI.18})$$

Dar cum punctul P este foarte departe de dipolul electric, se poate face aproximația că $r_1 \approx r_2 \approx r$ și atunci pentru potențialul electric în punctul P se găsește :

$$V_p = \frac{2kae \cos \theta}{r^2} \quad (\text{VI.19})$$

Un dipol electric se caracterizează prin momentul său dipolar care este prin definiție produsul între sarcina electrică a dipolului și distanța dintre saicini, deci în cazul prezentat momentul dipolar va fi ;

$$\mu = 2ae \quad (\text{VI.20})$$

Introducând (VI.20) în (VI.19), se obține pentru potențialul electric în punctul P :

$$V_p = k\mu \frac{\cos \theta}{r^2} \quad (\text{VI.21})$$

Deci potențialul electric al unui punct în raport cu un dipol electric este invers proporțional cu pătratul distanței de la dipol la acel punct, direct proporțional cu momentul dipolar al dipolului și depinde de $\cos \theta$, θ fiind unghiul format de linia interpoalară și linia de derivație (pentru derivația monopolară linia care leagă punctul studiat de centrul dipolului, adică OP; în cazul derivației bipolare, linia de derivație este dreapta care leagă cei doi electrozi).

Potențialul electric al unui punct în raport cu o suprafață polarizată, așa cum este membrana celulară, depinde de unghiul solid sub care se vede aceea suprafață.

Considerînd o suprafață încărcată cu electricitate, fie ea dS, atunci potențialul electric în punctul P (Fig. VI.12a,b),

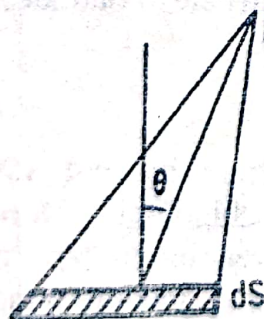


Fig. VI.12a

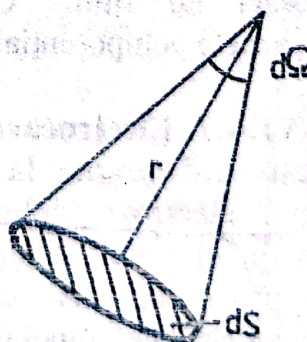


Fig. VI.12.b

$$V_p = k\mu \frac{\cos \theta}{r^2} dS \quad (\text{VI.22})$$

Dar cum, pentru unghiul solid, după Fig. VI.12b, se poate scrie expresia :

$$d\Omega = \frac{dS \cos \theta}{r^2} \quad (\text{VI.23})$$

Din (VI.22) și (VI.23) se obține pentru potențialul electric în punctul P :

$$V_p = k\mu d\Omega \quad (\text{VI.24})$$

Deci pentru înregistrarea potențialului electric al inimii, nu se înregistrează direct potențialul dipolului cardiac, ci variațiile acestui potențial în diferite puncte periferice, din care trebuie să se deducă apoi indirect caracteristicile proprii ale dipolului cardiac. În Fig. VI.13 este prezentată schematic diagrama dipolului cardiac (pentru om)

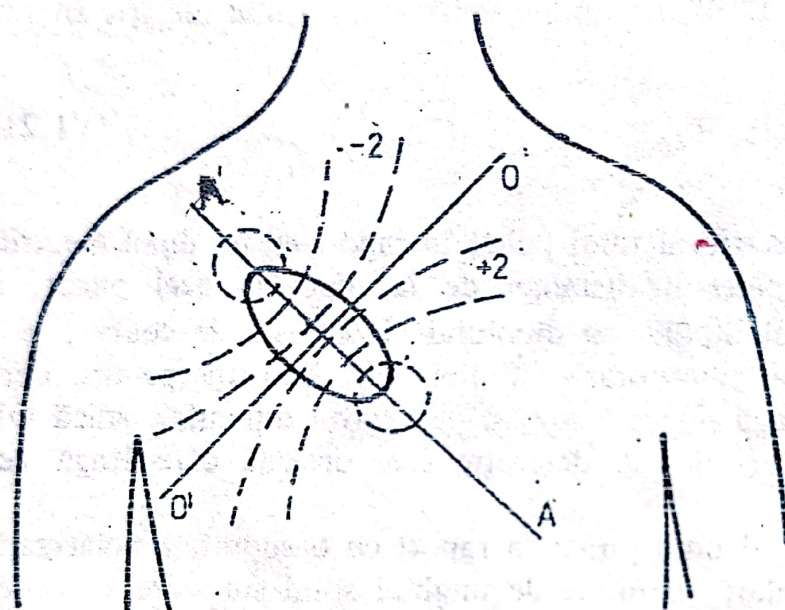


Fig. VI.13

În Fig. VI.13 AA' este axa electrică a inimii iar axa OO' este linia ecuatorială și este perpendiculară pe AA'. Potențialele electrice se distribuie în jurul polilor cardiaci iar liniile câmpului electric (curbele continue) sunt perpendiculare pe curbele echipotențiale (curbele punctate).

VI.6.2. Electrocardiograma (EKG)

Primele electrocardiograme la om au fost realizate în anul 1902 de Einthoven utilizând electrozi aplicați în derivație bipolară. Derivațiile monopolare conțin un electrod activ, plasat în apropierea inimii iar celălalt electrod, electrodul pasiv care este cel negativ este plasat într-un punct mai îndepărtat: în cazul derivației bipolare, ambii electrozi sunt activi, culeg deci potențiale.

Electrocardiogramele care se obțin prin aplicarea electrozilor direct pe inimă în timpul operațiilor la om (sau la animale) arată valori ale potențialului de

ordinul a 30 mV, în timp ce aplicarea electrozilor pe piele arată potențiale de ordinul a 1-2 mV. Aceasta demonstrează că țesuturile au o anumită rezistență electrică fapt pentru care semnalele electrice sunt amplificate de instalații speciale.

Electrocardiograma reprezintă graficul variațiilor de potențial ale inimii.

Tehnicile uzuale folosesc derivațiile bipolare, electrozii fiind montați sub forma unui triunghi, în trei puncte de pe corp, astfel :

- I - un electrod pe mîna stîngă iar cel de-al doilea , pe mîna dreaptă ;
- II - un electrod pe mîna dreaptă iar cel de-al doilea , pe piciorul stîng ;
- III - un electrod pe mîna stîngă iar cel de-al doilea , pe piciorul stîng ;

Potențialele obținute reprezintă proiecțiile vectorului cardiac. V_C , pe axele de explorare care formează un triunghi denumit triunghiul lui Einthoven (Fig. VI.14).

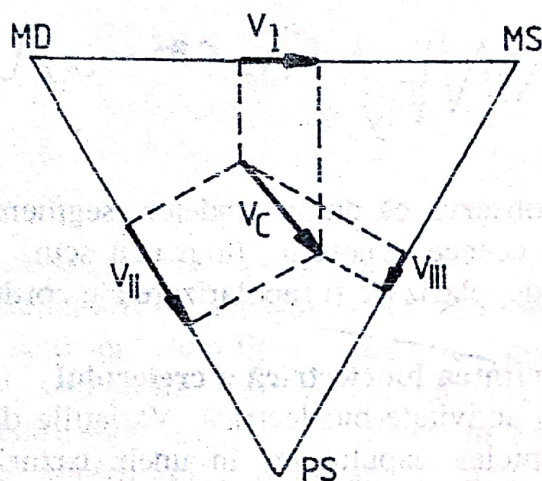


Fig. VI.14

Cele trei proiecții permit reconstituirea vectorului electric al inimii V_C și stabilirea axei electrice a inimii care nu coincide întotdeauna cu axa anatomică. Pentru om electrocardiograma are forma din Fig. VI.15

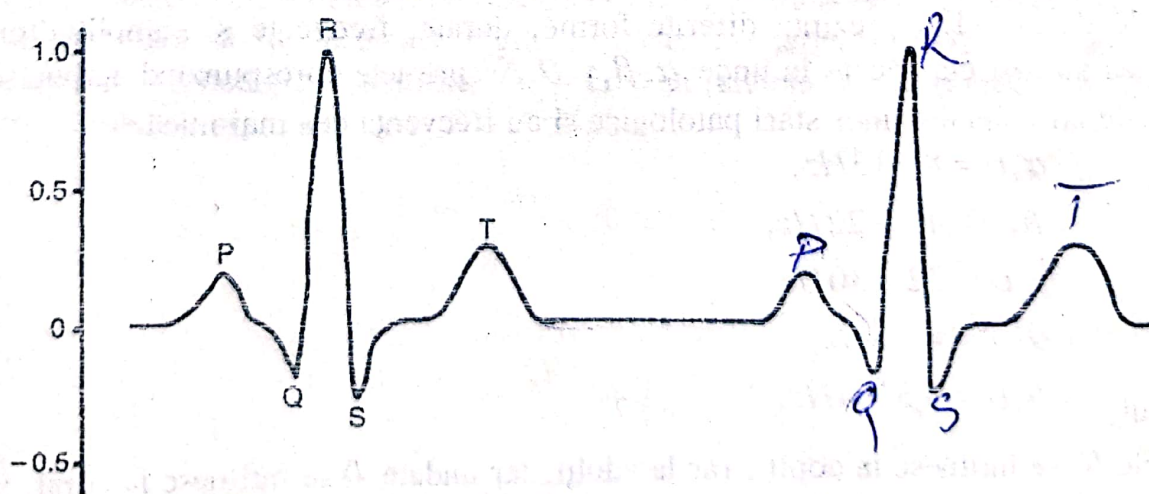


Fig. VI.15

Electrocardiograma normală prezintă o succesiune de 5 componente notate de Einthoven cu litere mari P, Q, R, S, T : unda P corespunde activității electrice atriale, undele Q, R, S, depolarizării ventriculare iar T, stării de repolarizare ventriculară. Analiza electrocardiogramei (EKG) (privind amplitudinea undelor, felul cum se succed, viteza și distanța dintre ele) dă informații în legătură cu unele anomalii în funcționarea cordului.

În cazul medicinei veterinare, metodele electrice au fost introduse mai târziu, de către Sporri în anul 1975. Electrocardiogramele sunt diferite în funcție de specie și starea fiziologică a animalelor (Fig. VI.16)

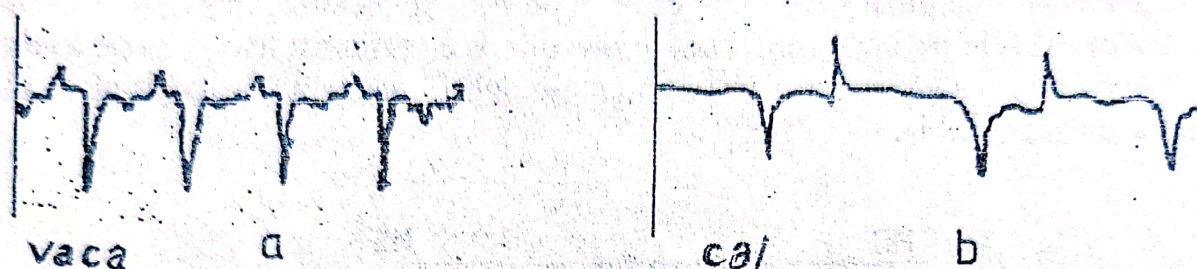


Fig. VI.16

Din Fig. VI.16 se observă că durata undelor, segmentelor și intervalelor este mai mică la taurine ceea ce denotă un timp mai scurt pentru desfășurarea fenomenelor electrice de depolarizare și repolarizare ale cordului.

VI.6.3. Activitatea bioelectrică a creierului

Creierul are și el o activitate bioelectrică. Variațiile de potențial se culeg cu electrozi montați pe pielea capului sau, în unele cazuri, direct pe scoarța cerebrală. Aceste potențiale sunt înregistrate și amplificate obținându-se electroencefalograma (EEG).

Activitatea bioelectrică a creierului cuprinde două părți :

- 1) activitatea evocată, care apare în urma stimulării receptorilor senzitivi ;
- 2) activitatea spontană, care este activitatea obișnuită.

Undele de pe EEG prezintă diferite forme, durate, frecvențe și amplitudini. Acestea au fost clasificate în unde α , β , γ , θ , Δ primele corespunzând activității normale iar celelalte unor stări patologice și au frecvența cea mai mică:

$$\alpha, \nu = 8 - 13 \text{ Hz},$$

$$\beta, \nu = 13 - 22 \text{ Hz},$$

$$\gamma, \nu = 22 - 30 \text{ Hz}$$

$$\theta, \nu = 4 - 8 \text{ Hz},$$

Ritmul $\Delta, \nu = 0,5 - 4 \text{ Hz},$

Undele θ se întâlnesc la copil, rar la adulți, iar undele Δ se întâlnesc la copil, la adult în timpul somnului și în cazuri patologice. În Fig. VI.17 prezentăm astfel de electroencefalograme.

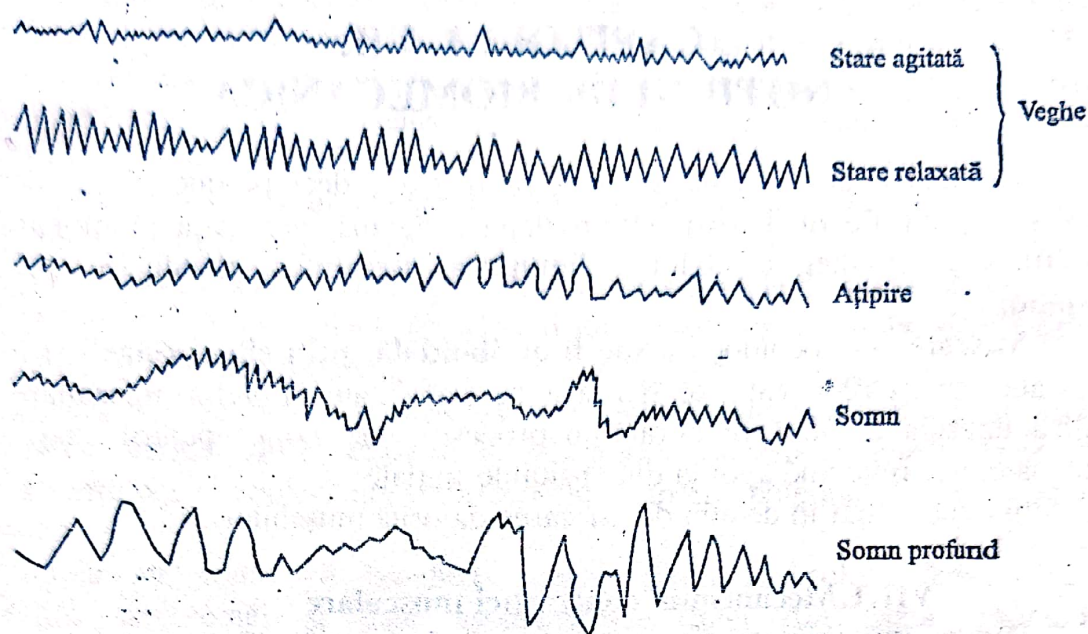


Fig.VI.17

Originea biocurenților este încă neelucidată.

Ea este dependentă atât de activitatea celulelor nervoase cât și a celor care umplu spațiul dintre neuroni. John Eccles care a luat premiul Nobel în anul 1963 arată că și în cazul Sistemului Nervos Central se recunosc aceleași procese bioelectrice ca și pentru alte organe. J. Eccles în cartea intitulată "Evoluția creierului și creația conștiinței", publicată în anul 1989, demonstrează că descoperirile neurofiziologice nu exclud existența unei conștiințe independente de creier.

Conștiința însă nu este total separată de corp (ca în viziunea dualistă) ci ar interveni asupra constituenților sinapselor din creier pentru a influența evenimentele în curs (fizica cuantică a permis să se arate că astfel de influențe pot avea aloc fără să fie încălcate legile materiei și energiei). Autorul încearcă să descrie acest model al conștiinței încercând să renunțe la tradiționala comparație între suflet și corp.

CAPITOLUL VII.

NOTIUNI DE BIOMECANICA

Animalele au capacitatea de a se mișca , deci produc lucru mecanic. Mișcările sunt fie de **transport**(circulația sangvină, ventilația pulmonară) sau modificarea poziției celulelor, eliminarea secrețiilor glandulare etc. sau **locomoție**

Mișcarea de locomoție poate fi **amiboidală**, prin **cili și flageli** și mișcări datorate **mușchilor** care se bazează pe capacitatea fibrelor musculare de a utiliza energia chimică procurată în procesele metabolice pentru a-și scurta dimensiunile, revenind apoi la dimensiunile inițiale.

Ne vom ocupa mai în detaliu de mișcarea datorită mușchilor.

VII.1.Mecanismul contracției musculare

Pentru mușchii striati , unitatea morfo-funcțională este sarcometrul în cadrul căruia se găsesc filamente groase alcătuite din molecule din miozină(proteină cu $M=600.000$) de forma unor baghete terminată cu două capete globulare care iau aspectul unei crose de hockey. În jurul lor sunt filamentele subțiri care au diametrul de $50\text{\AA}$ și sunt formate din proteinele : actină, tropomiozină și troponină. Ele sunt așezate ca două lanțuri torsionate(ca un șirag de perle) dând o formă fibrilară(Fig.VII.1)

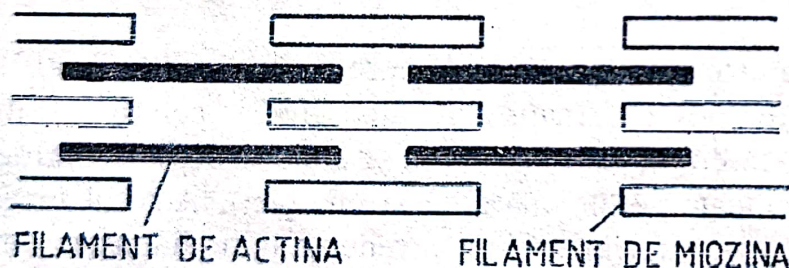


Fig.VII.1

Contracția musculară este dată de deplasarea relativă a moleculelor proteice de miozină și actină, această deplasare producându-se atunci când se produce o depolarizare pronunțată a sarcolemei. Depolarizarea este asigurată printr-un potențial de acțiune muscular propagat de-a lungul fibrei care este declanșat printr-un influx nervos ce ajunge la joncțiunea neuro-musculară.

Facem observația că fibrele musculare se găsesc într-o strânsă interdependență cu sistemul vascular și cu cel nervos.

S-a crezut inițial că biopotențialul de acțiune muscular ar fi declanșat direct de biopotențialul nervos. Această ipoteză este contrazisă de faptul că diametrul fibrei musculare este de 10 ori mai mare decât a celei nervoase. De aceea se consideră că axonul furnizează doar potențialul de prag pentru sarcolemă. Se pare că următoarele fenomene se produc în placa motorie (joncțiunea neuro-musculară):

a) sinteza și stocarea unui mediator chimic, acetilcolina, în veziculele din partea terminală a fibrei nervoase,

b) influxul nervos eliberează aproximativ 10^6 molecule de acetilcolină, acetilcolina difuzează spre placa motorie și dă naștere unei depolarizări locale numită potențial de placă motorie.

c) potențialul de placă motorie se comportă ca un prepotențial și dacă depolarizarea produsă de potențialul de placă motorie este suficient de mare pentru a produce depolarizarea sarcolemei, apare potențialul de acțiune propagat.

Studiile au arătat că bioelectrogenesa fibrei musculare depinde de proprietățile sarcolemei și este asemănătoare celei din cazul axonului nemielinizat. Fibra prezintă un potențial de repaos de circa 60-90mV interiorul fiind negativ în raport cu exteriorul. Când este excitată membrana produce un potențial de acțiune de circa 100mV, care durează câteva milisecunde. Caracteristicile excitației musculare sunt asemănătoare celor discutate în cazul influxului nervos.

Propagarea potențialului de acțiune are loc fără o direcție privilegiată, cu o viteză de ordinul metrilor pe secundă ($4-5\text{ms}^{-1}$ pentru om). Pentru o fibră de lungime medie deci, excitația poate fi transmisă de la un capăt la altul, practic instantaneu.

În mecanismul contracției musculare ATP-ul asigură energia necesară contracției și menține mușchiul în poziție contractată sau relaxată. În procesele chimice care au loc în timpul contracției musculare, ionul de Ca^{2+} are o funcție coordonatoare. Această funcție se realizează numai la concentrații suficiente de ATP, condiție realizată de celula musculară.

Și în cazul musculaturii netede, contracția se realizează tot prin glisarea filamentelor contractile care nu au însă o dispoziție la fel de precisă ca la cele striate. Biopotențialele aici sunt de două tipuri: biopotențiale de lungă durată (de tipul celui cardiac) și biopotențiale de scurtă durată (uter, intestinul gros).

Mărimea și frecvența biopotențialelor depind de compoziția ionică a mușchiului, temperatură, tensiunea mușchiului, compoziția hormonală etc.

Mecanismul contracției musculare este încă o problemă în studiu întrucât fenomenele de contracție și relaxare nu sunt complet distincte, existând fenomene chimice care se pot produce atât în faza de contracție cât și în cea relaxată.

Cercetări ale contracției sarcomerului realizate cu ajutorul difracției laser au arătat că mecanismul glisării trebuie reconsiderat, întrucât reactivitatea filamentelor în fazele de activitate ale sarcomerului nu este absolută.

Astfel, în faza de contracție, unele molecule ce nu cuplează ionul de Ca (deci nu fixează molecula de ATP) rămân în stare relaxată iar altele, în faza de relaxare a sarcomerului pot fixa Ca determinând individual, o reacție de migrare către zona mediană a sarcomerului.

VII.2. Termodinamica contracției musculare.

În timpul contracției musculare se efectuează lucru mecanic pe seama consumului de energie al mușchiului. Conform principiului I al termodinamicii, variația elementară a energiei interne a mușchiului este egală cu suma dintre căldura schimbată cu exteriorul, variația de energie chimică ce ia parte la proces și lucrul mecanic efectuat în exterior. Dacă mușchiul este încărcat cu sarcina F el se scurtează cu dl , efectuând lucrul mecanic Fdl . Atunci principiului I al termodinamicii se scrie:

$$dU = dQ + dU_{ch} + Fdl \quad (VII.1)$$

1. Contracția este **izotonică** în cazul unui mușchi izolat și care nu are schimb de substanțe cu exteriorul, deci $dU_{ch} = 0$. Relația (VII.1) se reduce la:

$$(dU)_F = (dQ)_F + Fdl \quad (VII.2)$$

2. Contracția este **izometrică** dacă, o sarcină F_0 , nu mai poate fi deplasată, l este constant, adică $dl = 0$ și atunci (VII.1) devine:

$$(dU)_l = (dQ)_l \quad (VII.3)$$

Aici paranteza semnifică variația la F respectiv l constant.

Făcând diferența relațiilor (VII.2) și (VII.3) și raportând la timp se obține:

$$\frac{d}{dt}[(U)_F - (U)_l] = \frac{d}{dt}[(Q)_F - (Q)_l] + \frac{Fdl}{dt} \text{ sau } \frac{dU}{dt} - \frac{dQ}{dt} + \frac{Fdl}{dt} \quad (VII.4)$$

Dar după definiția lucrului mecanic și a puterii mecanice, se poate scrie:

$$P = \frac{dL}{dt} = \frac{Fdl}{dt} = Fv \quad (VII.5)$$

Pentru a caracteriza un mușchi este necesar să se cunoască legătura între forțe și viteza de contracție a mușchiului. Pe baza datelor experimentale A.V. Hill a găsit între aceste mărimi următoarea relație:

$$(F + a)(v + b) = (F_0 + b) = \text{const} \quad (VII.6)$$

a, b fiind niște constante iar F_0 forța la care mușchiul nu se mai contractă. Atât a, b cât și F_0 sunt caracteristici fiecărui mușchi.

Din (VII.6) pentru viteza de contracție a mușchiului se obține:

$$v = \frac{(F_0 - F)b}{F + a} \quad (VII.7)$$

Din această relație se observă că viteza este maximă când $F=0$, deci :

$$v_{\max} = \frac{F_0 b}{a}$$

Folosind relațiile de mai sus putem arăta că lucrul mecanic și puterea mecanică sunt maxime pentru $F=F_0/3$. După (VII.5) și (VII.7) avem :

$$P = Fv = Fb \frac{F_0 - F}{F + a} \quad (\text{VII.8})$$

Anularea primei derivate, luată în raport cu F , a acestei mărimi conduce la :

$$b \frac{F_0 - F}{F + a} + bF \frac{-(F + a) - (F_0 - F)}{(F + a)^2} = 0 \quad (\text{VII.9})$$

Efectuând calculele în (VII.9) se găsește ecuația în F pentru care puterea și lucrul mecanic sunt maxime :

$$F^2 + 2Fa - F_0 a = 0$$

ceea ce dă pentru F valoarea :

$$F = -a + \sqrt{a(a + b)} \quad (\text{VII.10})$$

Pentru că $a \cong F_0/4$ se găsește că forța pentru care lucrul mecanic este maxim este $F=F_0/3$. În Fig. VII.2 sunt reprezentate viteza de variație a energiei interne a mușchiului și lucrul mecanic efectuat în unitatea de timp (puterea mecanică).

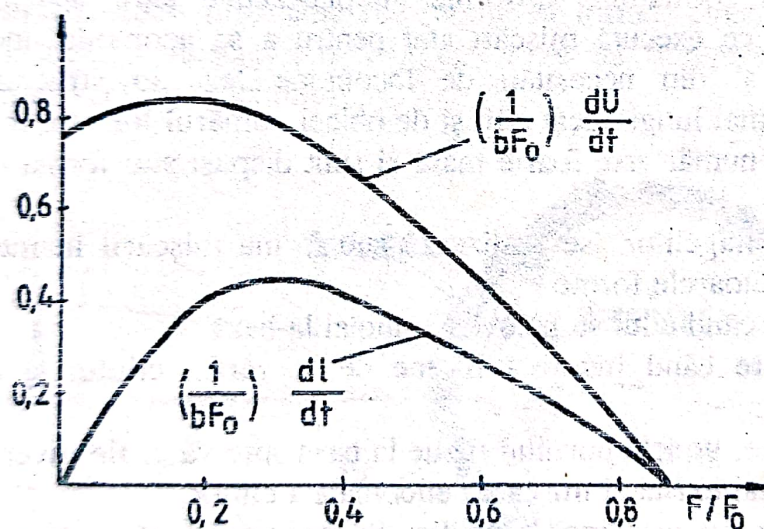


Fig. VII.2

Din figură se observă că lucrul mecanic este maxim la o forță egală cu $1/3$ din valoarea forței pe care nu o mai poate deplasa.

Tensiunea maximă suportată de mușchi depinde de lungimea sarcomerului ceea ce este în concordanță cu teoria glisării, conform căreia F_0 (încărcarea maximă) depinde de mărimea zonei de suprapunere a filamentelor. (Fig. VII.3) Atunci când F_0 este maximă, adică pentru $F_0/F_{\max}$ este egal cu unitatea, are loc o suprapunere maximă a celor două tipuri de filamente

La lungimi mai mari ale sarcomerului însă, suprapunerea scade ceea ce antrenează scăderea lui F_0 . Când scurtarea este excesivă, filamentele sunt deformate și scade și F_0 .

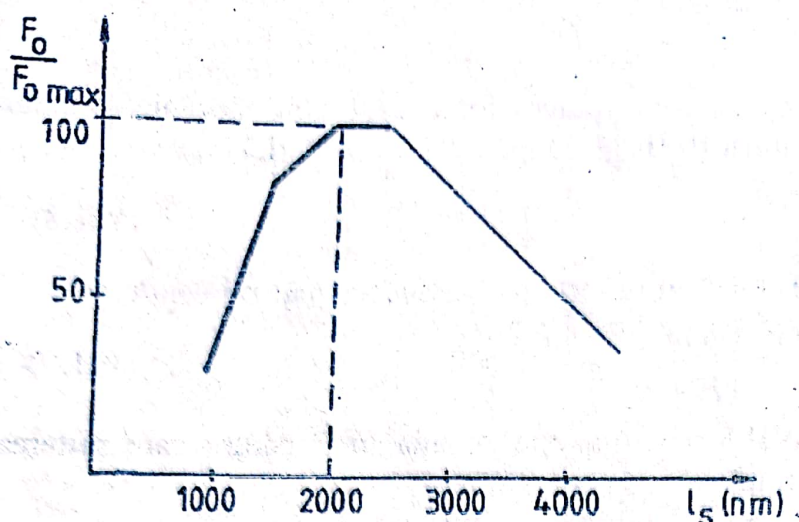


Fig.VII.3

Ecuatia lui Hill (VII.6) este valabilă in regiunea platoului curbei din figura VII.3 , adica pentru lungimi ale sarcomerului cuprinse între 1700-2500nm.

VII.3.Mișcarea prin cili, flageli și amiboidală

Cilii și flagelii sunt formațiuni filiforme citoplasmatiche care apar la suprafața diferitelor celule ce execută mișcări atât pentru a se acomoda unor necesități ale hranei cât și din necesități de locomoție. Deși au structură asemănătoare, flagelii sunt mai lungi decât cilii și de obicei numărul lor este mai mic decât al cililor a căror număr este foarte mare și sunt dispuși sub formă de șiruri.

Mișcarea cililor și a flagelilor se realizează sub forma mișcării înainte-înapoi care se face sub următoarele forme :

- 1) mișcarea pendulară când cilul se încovoie numai la bază
- 2) mișcarea de biciuire când indoirea începe de la vârful cilului și se continuă spre bază

- 3) mișcarea ondulatorie, unde pornind fie de la bază spre vârf, fie invers. In afară de aceste mișcări mai există și mișcarea elicoidală a cililor.

Mecanismul mișcării cililor nu este încă elucidat. Se presupune că și aici se realizează un mecanism glisant.

Mișcarea amiboidală, caracteristică amibelor, se face prin prelungiri ale celulelor numite pseudopode a căror poziție este în permanentă mișcare și schimbare.

CAPITOLUL VIII. ANALIZATORII

prata 113

VIII.1 Analizatorul vizual.

Recepția luminii, adică a undelor electromagnetice cu lungimi de undă având valorile cuprinse între 400-760nm este una din activitățile cele mai importante pentru viața organismelor deoarece permite obținerea celei mai mari cantități de informații despre mediul exterior. Adaptarea organismelor la percepția luminii poate fi urmărită prin studiul structurii oganelor receptoare la diferite animale. Fotoreceptorii au diferite forme, de la sistemele foarte primitive la cele mai elaborate, la organismele superioare și om. Formele primitive aparțin anumitor alge și moluște ale căror celule sunt sensibile la lumină, în special în ceea ce privește intensitatea luminii și a direcției fluxului luminos. Organele superioare posedă un organ specializat pentru percepția luminii care este ochiul.

VIII.1.1. Ochiul.

Analizorul vizual(ochiul) este un sistem care receptează, analizează și sintetizează informația referitoare la forma, dimensiunea culoarea și mișcarea spațială a obiectelor. În Fig.VIII.1 se dă o reprezentare schematică (secțiune transversală) a ochiului

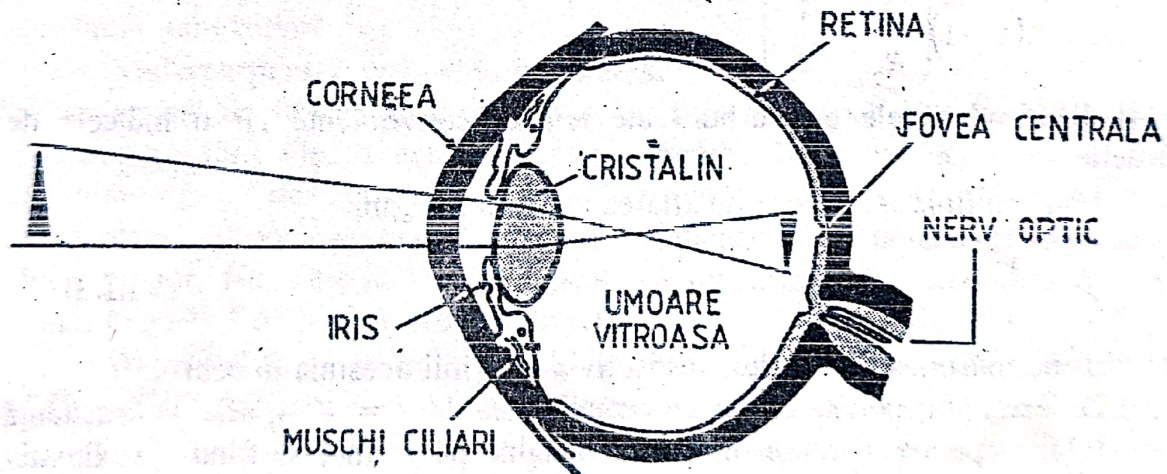


Fig.VIII.1

Din punct de vedere optic, ochiul este un sistem optic centrat, rezultând din medii optice cu indici de refracție diferiți, delimitați de dioptri cu centri de curbură situați pe aceeași dreaptă. Sistemul optic centrat conține în principal trei componente: prima este corneea (corneea are indicele de refracție $n=1,377$) ce are în spatele ei umoarea apoasă ($n=1,336$); a doua componentă este o lentilă proprie-zisă, cristalinel ($n=1,424$), a cărei convexitate poate fi modificată de mușchiul ciliar, modificându-se astfel distanța focală; cea de-a treia componentă

sensibilă la lumină este umoarea vitroasă, cu $n=1,336$. Ca urmare există trei dioptri ce formează sistemul optic centrat (deci lumina suferă fenomenul de refracție în trei locuri). Acești dioptri sunt următorii :

1) **Dioptrul corneean** (suprafața de separație este corneea, refracția are loc la trecerea luminii din aer în cornee)

2) **Dioptrul cristalinian anterior** (suprafața de separație este fața anterioară a cristalinului deci refracția are loc la trecerea luminii de la umoarea apoasă la cristalin) ;

3) **Dioptrul cristalinian posterior** (refracția are loc în partea posterioară a cristalinului, la trecerea din cristalin la umoarea vitroasă)

Acest sistem de dioptri proiectează o imagine a obiectelor din mediul înconjurător, imagine care se obține pe retină.

VIII.1.2. Formarea imaginii în ochiul redus

Parametrii ochiului pot fi caracterizați tratând toate mediile optice ale ochiului ca și cum ar forma o lentilă convergentă. Acest model reprezintă ochiul redus. Distanța la care se formează imaginea în această lentilă este dată de formula fundamentală a lentilelor :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \quad (\text{VIII.1})$$

În (VIII.1) x_1 reprezintă distanța de la obiect la lentilă, x_2 reprezintă distanța de la lentilă la imagine iar f este distanța focală a lentilei dată de relația :

$$f = \frac{1}{(n-1) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right)} \quad (\text{VIII.2})$$

R_1 și R_2 fiind razele de curbură ale lentilei convergente iar n indicele de refracție.

Mărirea liniară β permite aflarea mărimii imaginii :

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{x_2}{x_1} \quad (\text{VIII.3})$$

y și y' fiind mărimea obiectului, respectiv a imaginii acestuia în ochi.

De exemplu, pentru un obiect cu înălțimea de $y = 40\text{m}$, aflat la o distanță $x_1 = -1000\text{m}$, pentru care se obține o imagine pe retină, x_2 fiind aproximativ $1,5\text{cm}$, se obține o imagine :

$$y' = y \cdot \frac{x_2}{x_1} = 6 \cdot 10^{-4} = 0,6\text{mm}$$

Formarea imaginii de către ochi este prezentată în Fig.VIII.2

Focalizarea imaginii pe retină se face prin variația automată a razei de curbură a cristalinului (prin acomodare), prin contracția sau relaxarea mușchiului ce acoperă cristalinul .

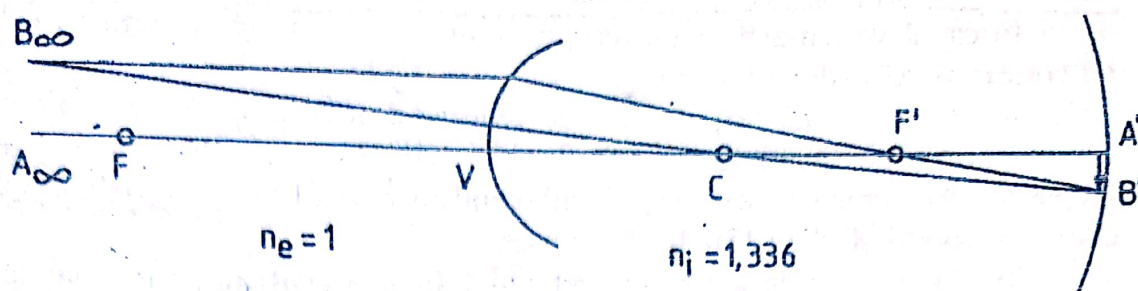


Fig. VIII.2

Pentru a optimiza funcționarea ochiului este necesar să se regleze cantitatea de lumină ce intră prin pupilă. Această reglare se face la nivelul deschiderii pupilei; ea se reduce sau se dilată datorită mușchilor ce formează irisul. Acomodarea se face totuși între anumite limite. Cel mai apropiat punct pentru care ochiul omenesc se poate acomoda este punctum proximum (care este de circa 25 cm și constituie distanța minimă a vederi clare pentru om de vîrstă mijlocie) iar cel mai îndepărtat, punctum remotum (care este de aproximativ 6m). la distanțe mai mari de 6m ochiul omenesc vede clar fără acomodare.

VIII.1.3. Biofizica vederii

Animalele se comportă diferit.

Astfel peștii văd de aproape fără acomodare, iar pentru a vedea la depărtare, își apropie cristalinul de retină. Animalele care trăiesc în mediu aerian au ochiul în repaus acomodat pentru vederea la distanță și pentru a vedea obiectele apropiate își îndepărtează cristalinul de retină prin modificarea presiunii intraoculare.

Vederea pentru om este binoculară.

Pivind un obiect cu ambii ochi, se formează două imagini, care diferă foarte puțin între ele. Aceste imagini se suprapun în centrul nervos rezultând o imagine unică, dar care dă senzația de vedere în relief. Datorită vederii binoculare se pot aprecia mai exact dimensiunile obiectelor din spațiul înconjurător. Nu toate animalele, pentru a vedea același obiect, privesc, ca și omul în același timp și în aceeași direcție.

Astfel calul, avînd ochii plasați în părțile laterale ale capului, poate vedea fără a întoarce capul, un câmp mult mai larg decât omul. Mai mult, iepurele are un câmp vizual de aproape 360°, ceea ce îl ajută să observe orice obiect, aflat în orice punct al orizontului. Dimpotrivă, la animalele de pradă, cum sunt leul, tigru sau pisica ambii ochi trebuie să privească în aceeași direcție, spre același obiect, pentru a avea o imagine spațială (de aceea ochii lor sunt foarte apropiați). Partea cea mai importantă a ochiului implicată în procesul vederii este retina. Partea internă a ochiului este tapetată cu țesut nervos, care constituie retina, pe care se proiectează imaginea obiectelor. Retina este un traductor care transformă semnalele luminoase într-o multitudine de semnale bioelectrice

(potențiale de acțiune), care se propagă prin segmentul intermediar, spre cel central, situat în lobii occipitali ai Sistemului Nervos Central.

În cazul vertebratelor fotoreceptorii sunt componente ale retinei, celulele cu conuri și celulele cu bastonașe

Celulele cu conuri sunt responsabile de vederea diurnă (fotopică) care la om și la unele specii de animale este colorată, iar cele cu bastonașe, vederii crepusculare (scotopică), care este în alb-cenușiu-negru. Există aproximativ $7 \cdot 10^6$ celule cu conuri și circa $130 \cdot 10^6$ bastonașe.

Regiunea centrală a retinei, denumită foveea centrală, care manifestă o acuitate vizuală maximă, are în exclusivitate, celule cu conuri mici. În același timp, numărul conurilor este mic la extremitățile retinei. Din acest motiv sensibilitatea la culoare este mai mare când privim direct un obiect, deoarece razele de la obiect ajung direct la foveea centrală. Din contra, sensibilitatea la culoare a părților laterale este foarte mică. Acest fapt se poate demonstra privind două obiecte de culori diferite pe care le mișcăm dintr-un punct aflat în fața ochilor, într-un punct aflat într-o parte laterală a capului unde mai poate fi văzut: în acest din urmă punct culorile nu se mai disting. În ceea ce privește intensitatea luminii, când aceasta este mică, vederea primară apare la stimularea bastonașelor pentru că pragul care declanșează producerea potențialului de acțiune este considerabil mai mic pentru bastonașe decât pentru conuri. Deoarece bastonașele sunt mai puțin numeroase în partea centrală a retinei, sensibilitatea în vederea frontală la lumina slabă este mai mică decât sensibilitatea pentru vederea laterală. Sensibilitatea bastonașelor (sau a vederii nocturne) este substanțial mai scăzută în cazul unei deficiențe de vitamina A. În cazul vederii scotopice (nocturne) maximul sensibilității ochiului este la o lungime de undă de 5100 Å , adică în domeniul radiațiilor verzi.

În cazul vederii fopice (luminozitate puternică), sunt active atât conurile cât și bastonașele și maximul sensibilității este la 5800 Å , care este în domeniul radiațiilor galbene (aceasta se pare că ar corespunde lungimii de undă care este mai abundentă în lumina soarelui) (Fig. VIII.3).

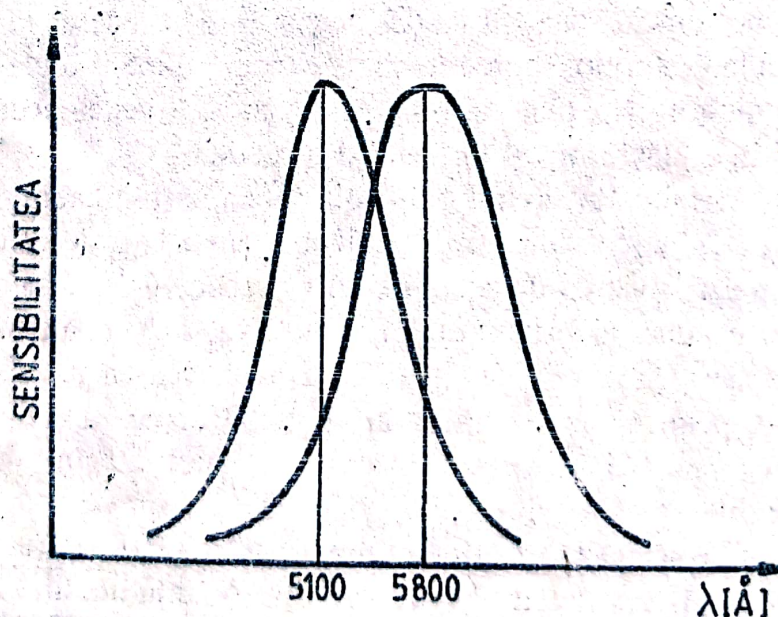


Fig. VIII.3

Faptul că, în curba de sensibilitate, maximul se deplasează spre lungimi de undă mai mici, la lumină slabă, explică de ce seara culorile capătă o nuanță albastruie. Această diferență de sensibilitate poate fi demonstrată observând petalele roșii ale unui trandafir în amurg. Când lumina este încă puternică, petalele roșii vor apărea mai strălucitoare decât frunzele verzi din vecinătate. Dacă luminozitatea începe să scadă, începe să crească strălucirea relativă a frunzelor verzi. Astfel că la vederea nocturnă (scotopică) frunzele verzi vor apărea mai strălucitoare decât petalele roșii. Faptul că vederea fotopică se realizează de către celulele cu conuri este demonstrat și de absența acestora la bufniță, liliac, iar că vederea scotopică se realizează cu celule cu bastonașe este demonstrat de absența lor la animalele adaptate la vederea fotopică (păsări de curte), care odată cu înserarea se duc la culcare.

Substanța fotosensibilă din bastonașe este rodopsina care este compusă dintr-un lanț polipeptidic (opsina) la care sunt legate covalent două molecule dintr-un cromofor denumit retinal. Spectrul de absorbție al rodopsinei este dat în Fig. VIII.4.

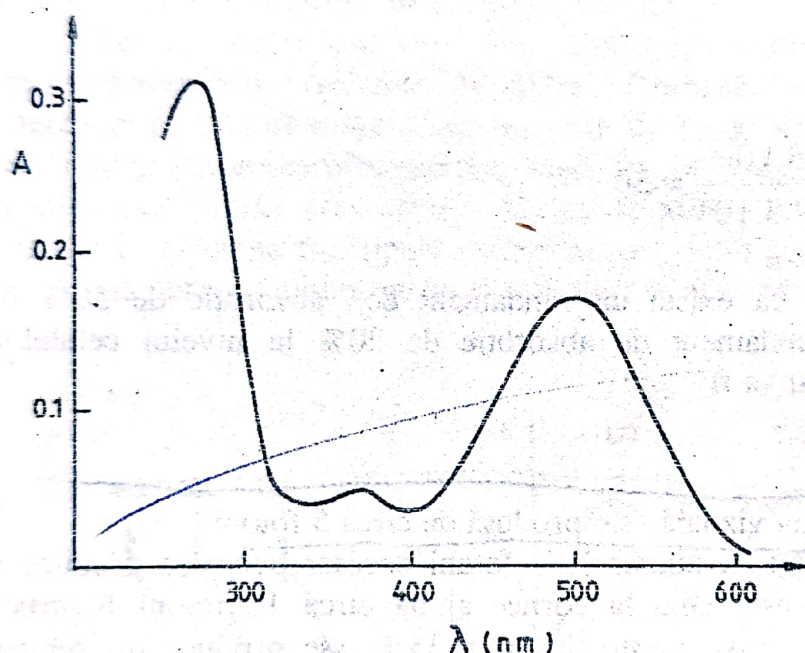


Fig. VIII.4

Rodopsina este localizată la limita superioară a bastonașului; există un singur strat de rodopsină, ea fiind distribuită în stratul bilipidic al membranei celulei, deși este posibil ca rodopsina să străbată și în exterior membrana. Circa 40% din aria exterioară a bastonașului este lipidică; dintre proteine circa 80% este rodopsină (rolul lipidelor este de a proteja rodopsina și a facilita reacțiile chimice care au loc la nivelul său). Bastonașul este compus dintr-o gramadă de câteva sute de astfel de formațiuni de rodopsină de forma unui disc. Structura bastonașelor nu este fixă, discurile putându-se mișca.

Prin primul pas în conversia energiei o constituie absorbția fotonilor de către cromofor, ceea ce schimbă conformația cromoforului. Printr-o reacție de înălbire, cromoforul se disociază de opsina, retinalul reducându-se la vitamina

A. Pașii reacției de înălbire sunt spectroscopic distincti, dar conexiunea dintre fiecare pas și conturarea excitației vizuale este încă necunoscută.

Totuși, se cunoaște că reacția de înălbire este mediată de niște enzime și are ca efect modificarea conformației opsinei. În acest proces se pare că rolul polipeptidelor este de a direcționa modificările în conformația cromoforului și de a crește randamentul cuantic față de randamentul cuantic ce s-ar realiza dacă cromoforul ar fi singur în soluție. Energia rezultată din acest proces fotochimic provoacă influxul nervos transmis apoi spre scoarța cerebrală. La întuneric rodopsina se regenerează; la proces se pare că participă și vitamina A din sânge.

Viteza și gradul de descompunere a fotopigmenților depind de intensitatea luminii și durată expunerii. Deci pentru a se produce excitația vizuală este necesar ca lumina să depășească un prag absolut de intensitate, care este dat de numărul minim de fotoni care pot produce excitația vizuală.

S-a calculat că semnalul care produce senzația vizuală are în medie 5 fotoni.

~~Dacă se consideră că semnalul minim care produce senzația vizuală are energie W de circa $2 \cdot 10^{-17} \text{ J}$ și cum energia fotonilor este :~~

$$W = nh\nu = nh \frac{c}{\lambda}$$

deci la corneă vin :

$$n = \frac{W\lambda}{hc} = \frac{2 \cdot 10^{-17} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 50$$

fotoni.

Dacă se presupune că există un randament de absorbție de 50% în umoarea apoasă și un randament de absorbție de 20% la nivelul celulelor senzitive, randamentul total va fi :

$$\eta = \frac{50}{100} \cdot \frac{20}{100} = 10\%$$

Deci la retină senzația vizuală este produsă de circa 5 fotoni.

Măsurătorile au arătat că numărul de fotoni necesar pentru a produce o senzație vizuală la pisică este când la corneă ajung circa 10 fotoni. Pentru că absorbția la nivelul ochiului pisicii este de circa 35%, se produce un semnal electric la nivelul ganglionului dacă aproximativ 6 fotoni ajung la retină.

Vederea colorată este un fenomen care a suscitat un viu interes atât din partea fizicienilor și chimiștilor cât și a fiziologilor și psihologilor și este, pînă în prezent, încă o problemă incomplet rezolvată. În ultimele două secole au fost elaborate circa 80 de teorii referitoare la vederea colorată. Dar nici una nu explică satisfăcător toate aspectele vederii colorate. Observația că trei culori fundamentale pot fi combinate, (de exemplu roșu, verde și albastru) în proporții adecvate, pentru a obține toate culorile compuse, a condus la teoriile tricromatice. Prima teorie tricromatică a fost elaborată de Young și apoi completată de Helmholtz și Maxwell, fiind cunoscută ca teoria Young-Helmholtz. Teoriile tricromatice presupun, în general 2 fenomene care explică vederea colorată :

a) existența a 3 mecanisme senzoriale în retină, datorate unor pigmenți fotoasimilatori (3 pigmenți), care au maxime de absorbție în domenii diferite ale spectrului vizibil, sau existența a 3 tipuri diferite de celule cu conuri care au fiecare un pigment caracteristic;

b) existența a 3 categorii de fibre nervoase care fac legătura între sistemul receptor și sistemul nervos central.

Pe baza acestor modele se consideră că, atunci când retina primește lumină albă (compusă), fiecare tip de pigment va absorbi lumina în funcție de spectrul său de absorbție și de compoziția spectrală a luminii incidente. Dacă se consideră că cele 3 tipuri de pigmenți aparțin unor celule cu conuri diferite, atunci toate nuanțele de culori apar datorită stimulării simultane, dar în moduri diferite, a celor 3 clase de celule cu conuri. În acest din ultim caz informațiile parcurg căi paralele diferite ale segmentului intermediar al analizatorului vizual pînă la segmentul central din cortexul vizual. Dacă se adaugă la aceste trei tipuri de conuri și bastonașele, atunci există patru tipuri de celule receptoare. Unele teorii tricromatice susțin și existența, în cortexul vizual, a unor zone corespunzătoare fiecărei culori fundamentale.

Teoriile tricromatice au fost confirmate experimental prin măsurătorile spectrofotometrice realizate de Stiles, Rushton, prin cele electrofiziologice efectuate pe conuri individuale realizate de către Kaneko și mai ales, pe baza celor microcitospectrofotometrice realizate de asemenea pe conuri individuale realizate de Marks. Măsurătorile făcute de Marks asupra retinei carasului auriu au pus în evidență trei tipuri de conuri ce conțin pigmenți care au maximul de absorbție pentru lungimi de undă diferite (Fig. VIII.5a).

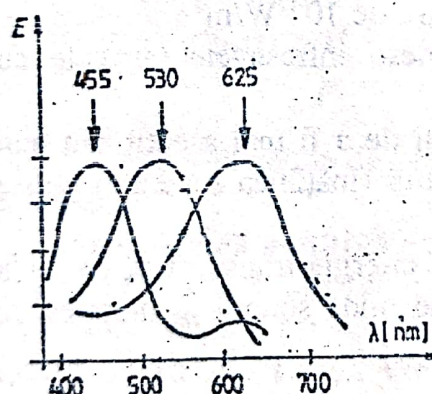


Fig. VIII.5a

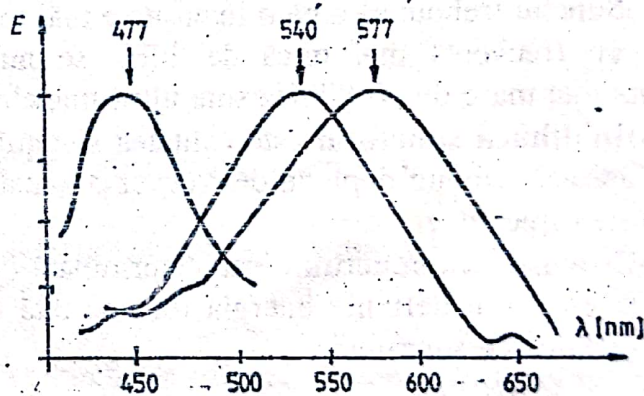


Fig. VIII.5b

Rezultate asemănătoare au fost obținute de Volkenstein studiindu-se retina la primate (Fig. VIII.5b).

În cazul retinei umane măsurătorile au pus în evidență existența a 3 maxime de absorbție pentru lungimile de undă de 440 nm, 535 nm și 620 nm ce corespund celor 3 fotopigmenți care au fost denumiți cianolab, clorolab și eritrolab.



Vederea colorată există la pești, reptile, păsări, dar, în același timp, multe mamifere, cu excepția primatelor, nu disting culorile. Dintre nevertebrate se remarcă insectele care posedă o mare capacitate de a distinge culorile. Mai mult, albinele sunt sensibile și la radiațiile ultraviolete. Facem observația că vederea colorată nu poate fi explicată numai pe baza stimulării celor 3 clase de celule cu conuri din retină. Acest lucru se poate demonstra dacă facem următorul experiment: se acționează asupra unui ochi numai cu lumină roșie iar asupra celuilalt separat cu lumină galben-verde; culoarea percepută de persoana respectivă este oranj.

Acest fapt demonstrează că sinteza culorilor este realizată doar parțial la nivelul retinei (nivelul receptor); ea este definitivată la nivelul celorlalte componente ale analizatorului vizual. În ceea ce privește capacitatea de transmisie a informației, s-a calculat că analizatorul vizual transmite cel mai mare flux de informație în raport cu ceilalți analizatori (auditiv, olfactiv, gustativ), acesta fiind de circa $4 \cdot 10^8$ biți într-o secundă.

Acest fapt justifică caracterizarea retinei ca fiind un "țesut nervos prin care creierul și-a creat un mod de a privi lumea din afară", el comportându-se ca un microcomputer atașat computerului central care este creierul.

VIII.2. Analizatorul auditiv

VIII.2.1 Sunetul și calitățile sunetului.

Sunetul reprezintă o undă care se propagă într-un mediu elastic prin intermediul câmpului sonor. Unda sonoră poate produce o senzație auditivă dacă îndeplinește următoarele condiții.

- 1) Sunetul trebuie să aibă frecvența cuprinsă între 20-20.000 Hz
- 2) Sunetul trebuie să aibă o durată mai mare de 0,06 s
- 3) Sunetul trebuie să aibă o intensitate mai mare de 10^{-12} W/m^2

Undele cu frecvența mai mică de 20 Hz se numesc infrasunete iar cele cu frecvența mai mare de 20.000 Hz sunt ultrasunetele.

a) **Înălțimea sunetului** este calitatea sunetului de a fi mai ascuțit sau mai grav; această calitate depinde de frecvența sunetului (înălțimea sunetului crește cu creșterea frecvenței).

b) **Intensitatea sunetului** este determinată de energia transportată de unda sonoră și este prin definiție energia transportată de unda sonoră în unitatea de timp și unitatea de suprafață:

$$I_s = \frac{1}{S} \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (\text{VIII.4})$$

unde ΔW este energia transportată de undă, Δt este timpul iar S este suprafața străbătută de undă.

Intensitatea sunetului are expresia:

$$I_s = \frac{1}{2} \rho v_{\max}^2 c \quad (\text{VIII.5})$$

unde c este viteza de propagare a undei, ρ este densitatea mediului iar $v_{\max}$ este viteza maximă de deplasare a particulelor în timpul oscilației.

Pentru caracterizarea sunetelor se folosește și presiunea sonoră ca fiind egală cu diferența dintre valoarea presiunii în acel punct în momentul respectiv și valoarea presiunii în lipsa undelor sonore. Ea are expresia :

$$p_s = \rho c v_{\max}$$

Determinările experimentale au arătat că sunetele audibile au o scară de intensitate foarte largă. Astfel, pentru sunetul cu frecvența de 1000Hz, intensitatea sunetului variază de la 10^{-12} W/m^2 până la 10^2 W/m^2 , adică 14 ordine de mărime. Datorită acestei game largi de valori, s-a introdus o altă mărime caracteristică, cu un domeniu mai restrâns, denumit nivel sonor

Nivelul sonor este prin definiție :

$$N_s = \log \frac{I_s}{I_0} \quad (\text{VIII.6})$$

În (VIII.6) I_0 este intensitatea de prag, care pentru un sunet cu frecvența de 1000Hz este 10^{-12} W/m^2

Cînd I_s variază de la 10^{-12} - 10^2 W/m^2 , nivelul sonor variază de la 0 la 14.

Unitatea de măsură pentru nivelul sonor este **belul** ; în practică se folosește însă decibelul.(dB)

$$N_s (\text{dB}) = 10 \log \frac{I_s}{I_0} \quad (\text{VIII.7})$$

Un bel este nivelul sonor al unui sunet care are intensitatea de 10 ori mai mare decît pragul de audibilitate.

La fel se poate defini și **nivelul de presiune sonoră**

$$L(\text{dB}) = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (\text{VIII.8})$$

unde p_0 este o presiune de prag care corespunde pragului I_0 doar la temperatura de 300K.

Intensitatea auditivă caracterizează senzația auditivă produsă de către un sunet. Introducerea acestei mărimi a fost necesară pentru că urechea percepe două sunete de aceeași intensitate, dar de frecvență diferită, ca două sunete de intensitate diferită. **Legea Weber-Fechner afirmă că senzația fiziologică este proporțională cu logaritmul excitației sonore.**

Prin definiție, intensitatea auditivă, I_A este egală cu intensitatea sonoră a unui sunet cu frecvența de 1000Hz, care produce aceeași senzație auditivă la un semnal dat; nivelul auditiv se definește analog nivelului sonor :

$$N_A = 10 \log \frac{I_A}{I_{A0}} \quad I_{A0} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Nivelul auditiv se măsoară în foni. Fonul este nivelul auditiv a cărui intensitate auditivă este 1,26 ori mai mare decît I_{A0} . Pentru sunetul

normal(1000Hz), $I_s = I_A$, $N_s = N_A$ deci scara fonilor coincide cu scara decibelilor.

c) **Timbrul sunetului** este caracteristica ce face să fie deosebite două sunete de aceeași intensitate sonoră și de aceeași frecvență, dar emise de surse diferite. Această proprietate decurge din faptul că, în general, un sunet nu este simplu, ci este compus dintr-o suprapunere de mai multe sunete de frecvențe $\nu, 2\nu, 3\nu$. Frecvența cea mai joasă se numește sunet fundamental, iar celelalte sunete, armonice superioare. De regulă, două corpuri ce emit același sunet fundamental, emit armonice superioare diferite și acestea definesc timbrul.

VIII.2.2. Absorbția sunetului

În procesul de propagare, unda sonoră este atenuată, intensitatea sonoră scăzând cu depărtarea de la sursa sonoră. Pentru caracterizarea atenuării se folosesc coeficientul de absorbție și de transmisie.

Coeficientul de absorbție se definește ca raportul dintre energia absorbită și cea incidentă :

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_{inc}}$$

Coeficientul de transmisie se definește ca raportul dintre energia transmisă și cea incidentă :

$$\tau = \frac{W_{trans}}{W_{inc}}$$

Dacă grosimea pereților ce limitează spațiul în care se află sursa sonoră este d , atunci intensitatea sunetului la ieșirea din perete este :

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (\text{VIII.9})$$

I_0 fiind intensitatea sonoră la pătrunderea în perete.

În mod obișnuit atenuarea unui sunet se apreciază cu mărimea denumită **izolare fonică D** definită prin relația :

$$D = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

Unitatea de măsură pentru izolarea fonică este **decibelul**.

Observație. Nivelul sonor este definit de raportul a două mărimi de același fel, deci ar trebui să fie o mărime adimensională. Faptul că se măsoară în dB, care este o unitate a unui raport (o mărime relativă) permite măsurarea tuturor mărimilor relative în dB.

De exemplu putem exprima masa relativă a unei persoane, dacă impunem un prag de masă. Dacă $m_0 = 6 \text{ Kg}$, pentru o masă de 60 Kg găsim :

$$N_m (\text{dB}) = 10 \log \frac{m}{m_0} = 10 \log \frac{60}{6} = 10 \text{ dB}$$

VIII.2.3 Structura analizatorului auditiv

Procesul de auz poate fi privit ca fenomenul de conversie a energiei mecanice, a unei sonore (sub forma variației de presiune din atmosferă), în semnale electrice care sunt procesate de cîmpul auditiv al creierului.

Pragul maxim și sensibilitatea maximă pentru frecvențele percepute de diferite specii de animale sunt date mai jos :

	Pragul maxim	Sensibilitate maximă
Om	20KHz	1-3KHz
Cimpanzeu	30KHz	0,1-3 KHz
Cîine	60KHz	0,2-6KHz
Pisică	100KHz	0,25-0,35KHz
Găină	12KHz	0,8-2 KHz
Liliac	150KHz	5-100KHz
Fluturi de noapte	175KHz	

Analizatorul auditiv conține următoarele părți :

- 1) urechea externă ;
- 2) urechea medie ;
- 3) urechea internă

O reprezentare schematică a analizatorului auditiv este dată în Fig. VIII.6

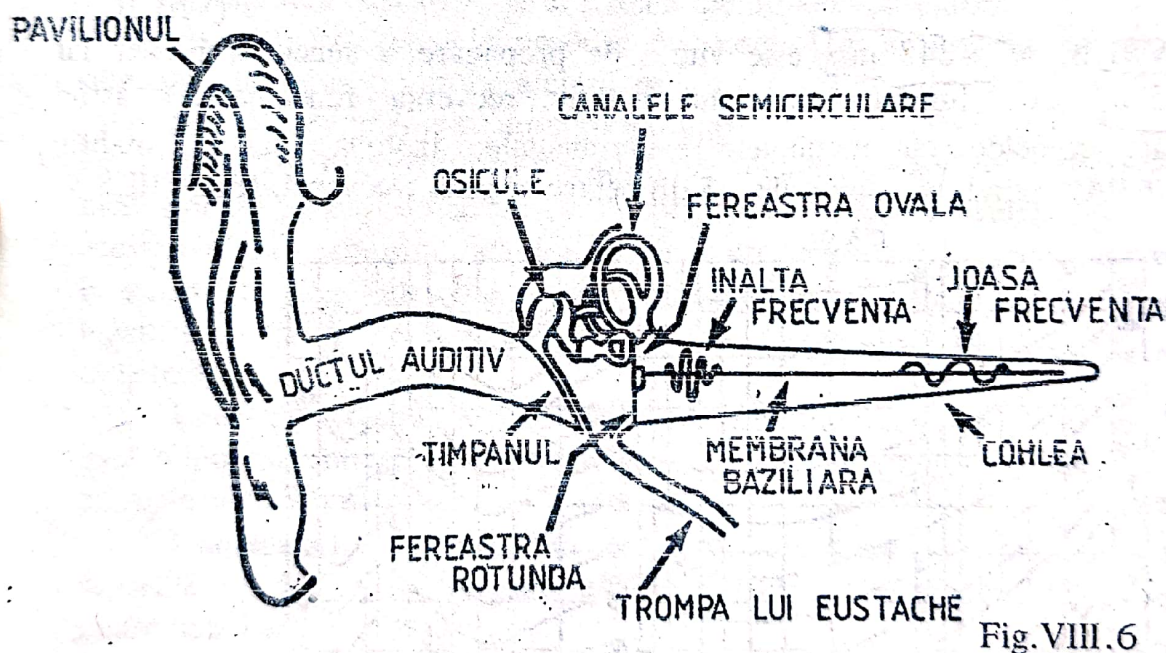


Fig. VIII.6

Urechea externă este alcătuită din pavilion, canalul (ductul) auditiv și timpanul. Pavilionul produce defazări și atenuări diferențiale ale undelor sonore, întărind efectul de localizare în spațiu. Ductul auditiv reprezintă un tub de legătură între exterior și urechea medie; se comportă ca un tub sonor, plin cu aer, deschis la un capăt (spre pavilion) și închis la celălalt (spre timpan) (Fig. VIII.7a,b)

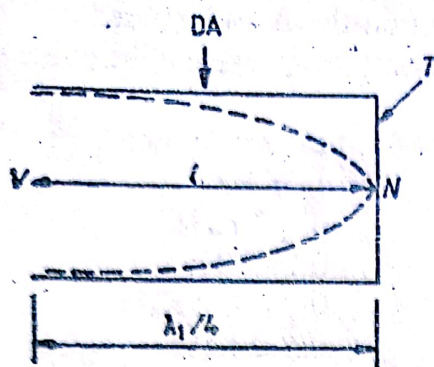


Fig. VIII.7a

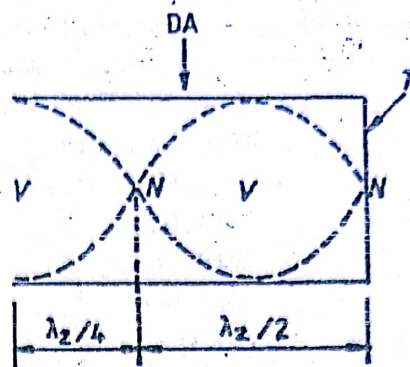


Fig. VIII.7b

Ductul auditiv îndeplinește următoarele funcții : transformă undele sonore sferice în unde plane, prezintă o rezonanță în jurul frecvenței de 3300Hz și constituie sediul undelor staționare. Frecvența fundamentală de rezonanță este, pentru cazul din Fig. VIII.7a

$$\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{4l} = 3300 \text{ Hz}$$

(VIII.10)

În (VIII.10) $c = 340 \text{ m/s}$ este viteza de propagare a sunetului în aer iar $l = 2.5 \text{ cm}$ este lungimea ductului auditiv. Frecvența fundamentală astfel calculată coincide cu rezultatele experimentale, izotona pragului auditiv inferior (PAI) avînd un minim de -5 dB pentru această frecvență. (Fig. VIII.8)

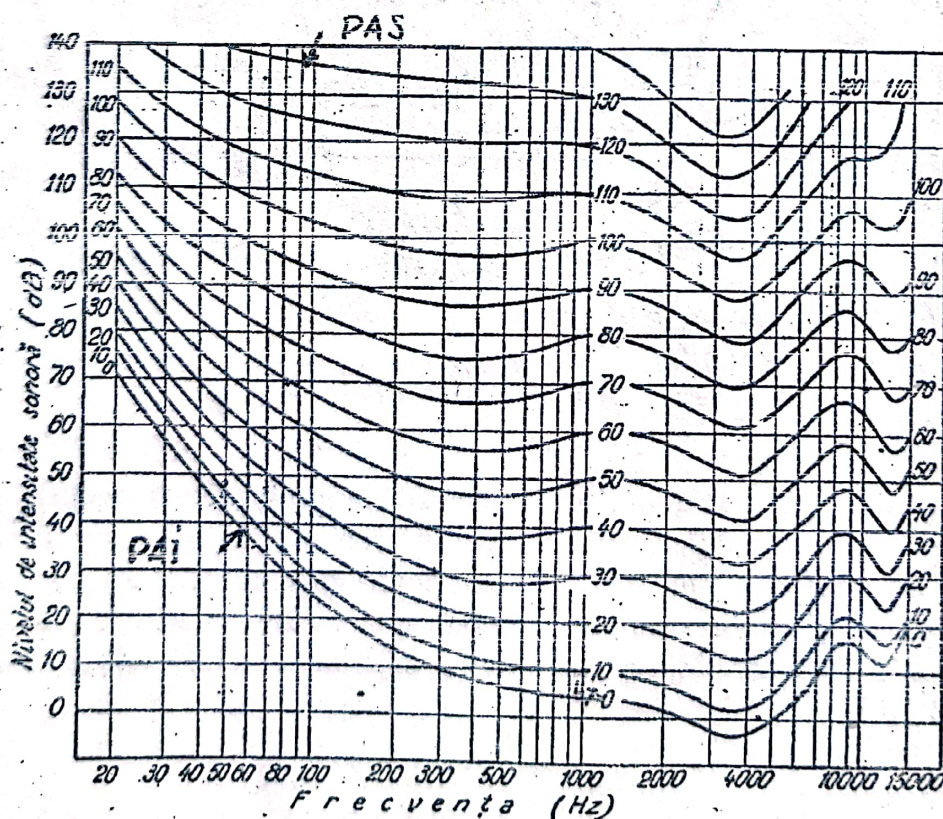


Fig. VIII.8

În Fig. (VIII.8) termenul PAS reprezintă pragul auditiv superior (pragul senzației dureroase). Frecvența primei armonice, la care ductul auditiv intră în rezonanță este, (după Fig. VIII. 7b) :

$$\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3c}{4l} = 9900 \text{ Hz}$$

În acord cu datele experimentale (în Fig. VIII.8) se observă că izofonele (curbele de același nivel auditiv) au un mic palier la o frecvență de circa 10.000 Hz.

Timpanul este o membrană conico-eliptică, asemănătoare difuzorului, care intră în vibrație datorită undelor staționare din ductul auditiv și transmite energia undelor sonore mai departe, prin intermediul ciocănelului, spre urechea medie. Forma conică a timpanului și existența unor fibre radiale în structura sa îi crește rigiditatea mecanică, ceea ce conduce la creșterea eficacității transmisiei undelor. Măsurătorile holografice asupra timpanului de pisică au arătat că el vibrează în întregime, spre deosebire de membrana plană, a unei tobe de exemplu, care este eficace aproximativ 1/3 din suprafața ei. Amplitudinea vibrațiilor timpanale, la PAI (pragul auditiv inferior) și 1000 Hz este de 0,1 Å.

Urechea medie este o cavitate mică, plină cu aer, în interiorul căreia se află 3 osicule: ciocănelul (în contact cu timpanul), nicovala și scărița. Osiculele au următoarele funcții :

a) amplifică mișcarea foarte slabă a membranei timpanice ;

b) amortizează sunetele produse de oasele din apropierea lor precum și semnalele produse de vibrațiile craniene ;

c) atenuează undele cu amplitudini mari

Vibrațiile timpanului se transmit ciocănelului iar acesta, prin intermediul nicovalei, le transmite scăriței ce se sprijină pe fereastra ovală (FO). De la FO aceste vibrații se transmit lichidului aflat în urechea internă. Urechea medie, are, în partea de jos, o deschidere spre trompa lui Eustache (TE) care o pune în legătură cu faringele, realizându-se presiuni medii egale pe cele două fețe ale timpanului.

Urechea internă se află într-o cavitate multicompartimentată situată în osul temporal cranian. Ea este formată din cohlee (melc), saculă, utriculă și canalele semicirculare.

Cohleea este organul care este implicat direct în auz. Cohleea este separată în două părți, longitudinal, de către o membrană elastică numită membrana bazilară

Membrana bazilară este formată din aproximativ 42.000 fibre transversale, având o lățime crescătoare începând de la bază (lungimea fibrelor variază de la 40 μm, la bază, până la 500 μm, în partea opusă). Canalul spiral de sub membrana bazilară care începe la fereastra rotundă (FR) se numește scală (rampă timpanică (RT)). Canalul spiral de deasupra membranei bazilare este împărțit longitudinal, de către membrana Reissner (MR), în două rampe: rampa vestibulară (RV) și rampa medie (RM) sau ductul cohlear. Rampa timpanică și rampa vestibulară sunt pline cu un lichid care se numește perilimfă, un lichid cu o compoziție similară lichidului cefalorahidian, iar ductul cohlear este umplut

cu un lichid numit **endolimfă**. Scufundat în endolimfă și pe toată lungimea membranei bazilare, se află organul spiral al lui Corti(OC), la nivelul căruia are loc conversia energiei mecanice a undelor sonore, în impulsuri nervoase(potențiale de acțiune).

Organul spiral al lui Corti se sprijină pe membrana bazilară.

VIII.2.4. Biofizica auzului.

Biofizica auzului implică următoarele fenomene: acest proces începe cu vibrațiile timpanului, ca răspuns la variațiile de presiune din atmosferă. Mișcarea timpanului produce o deflexie a elementelor urechii medii(osiculele). Proprietățile mecanice ale structurii lor produc o compresie variabilă a lichidului cohlear care urmează variațiile presiunii atmosferice.

Deplasarea membranei bazilare este "**trăgaciul**" pentru semnalul nervos. Organul spiral al lui Corti este flancat cu celule ciliate, celule care au niște perișori dispuși ca într-o pensulă și care constituie elementele neuronale ale segmentului receptor unde are loc conversia semnalelor mecanice în semnale electrice. Ele sunt sensibile la stimuli mecanici foarte slabi. La mamifere, de exemplu, ele încep să elaboreze potențiale de acțiune când extremitatea cililor se deplasează pe distanțe sub $1\text{\AA}$.

Celulele ciliate se află în contact cu cele două lichide, endolimfa și perilimfa, de concentrații ionice diferite. Concentrațiile ionilor de K și Na în endolimfă sunt asemănătoare cu acelea din interiorul celulelor, deci mare pentru ionii de K și mică pentru ionii de Na. În perilimfă, concentrația ionilor de K și Na este tocmai invers distribuită: concentrația ionilor de Na este mult mai mare decât cea a ionilor de K. Deoarece principalul ion pozitiv din endolimfă este K, se consideră că el este implicat în mecanismul de conversie a energiei la nivelul celulelor ciliate.

Celulele ciliate sunt sensibile diferențiat în funcție de direcția și sensul stimulilor mecanici. Mecanismul percepției sunetelor este explicat pe baza unor modele teoretice dintre care amintim doar două:

- a) - teoria zonală(rezonanței);
- b) - teoria undei propagate(undei călătoare)

a) **Teoria zonală** a fost dezvoltată de Ohm, iar apoi Helmholtz a dat acestei teorii o formă matematică elegantă și simplă totodată.

Morfologia membranei bazilare(este formată din fibre transversale) l-a determinat pe Helmholtz să considere că ea se comportă ca o mică harpă.

Atunci când coardele acesteia sunt tensionate longitudinal, intră în vibrație, fiecare fibră vibrând independent de existența celorlalte, dar în rezonanță cu sunetul incident.

b) **Von Bekesy** arată în teoria sa că rezonatorii(fibrele) membranei bazilare nu sunt independenți, ci sunt cuplați anatomic, deci nu pot vibra independent unul de celălalt.

El a demonstrat că mișcarea membranei bazilare se face în mod compact sub forma unor unde(valuri) care au următoarele caracteristici:

-iau naștere la baza membranei bazilare, adică lângă fereastra ovală,

-se deplasează de la bază spre partea opusă (de la partea mai rigidă spre partea mai puțin rigidă),

- poziția maximului depinde de frecvența sunetului.(Fig.VIII.9).

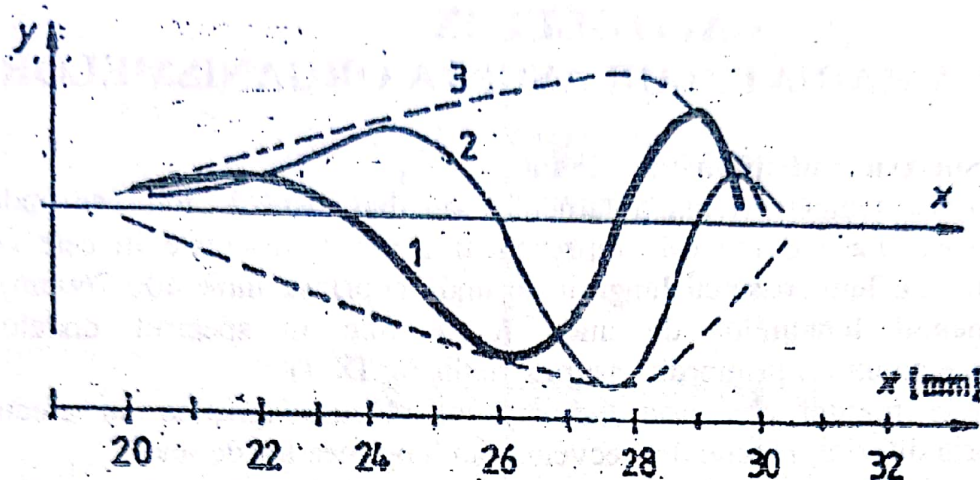


Fig.VIII.9

Etapele ulterioare ale perceperii sunetelor sunt legate de funcționarea creierului.

Astfel, înălțimea sunetelor (frecvența sub care acestea sunt percepute) este codificată spațial, fiecărei frecvențe corespunzându-I un anumit punct de pe cortex, unde sosesc potențialele de acțiune de la celulele ciliate care sunt situate în anumite poziții pe membrana bazilară.

Intensitatea sonoră se codifică prin creșterea frecvențelor de repetiție a potențialelor de acțiune. Când însă intensitatea sonoră depășește un anumit prag, depășind capacitatea de transmisie a unui neuron, are loc procesul de recrutare, când mai multe fibre nervoase transmit, în paralel, același potențial de acțiune. Intensitățile diferitelor sunete sunt codificate și ele în zone diferite de pe cortexul auditiv.

În concluzie, pentru înțelegerea fenomenelor legate de percepția sunetelor trebuie să se cunoască atât fenomenele fizice care au loc la nivelul segmentului receptor, dar și cele legate de funcționarea creierului.

* *
Freddy
15 february 2000 *

CAPITOLUL IX.

ACTIUNEA RADIATIILOR ASUPRA ORGANISMELOR

IX.1 Spectrul radiațiilor neionizante

Numeroase tehnici privind tratamentul sau diagnosticul folosesc unde electromagnetice; unele dintre cele reprezentative vor fi discutate în cele ce urmează. Radiațiile luminoase (cu lungimi de undă cuprinse între 400-760nm), deși au domeniul lungimilor de undă foarte mic în spectrul undelor electromagnetice au un rol primordial asupra vieții (Fig. IX.1)

Diferitele regiuni ale spectrului undelor electromagnetice au efecte fiziologice foarte diferite, funcție de frecvența sau lungimea lor de undă.

De exemplu, corpul omenesc este transparent față de undele radio, devine opac pentru radiațiile din domeniul vizibil și devine din nou transparent pentru razele Roentgen (X). Faptul că radiațiile electromagnetice au diferite efecte se explică prin faptul că acestea posedă energii diferite în funcție de frecvență.

Explicația acestor efecte se poate face doar în cadrul teoriilor cuantice. (lumina, ca de altfel undele electromagnetice în general, are atât caracter ondulatoriu cât și corpuscular).

Energia cuantelor undelor electromagnetice, conform teoriei cuantelor lui Planck este:

$$E = h\nu \quad (IX.1)$$

h fiind constanta lui Planck iar ν este frecvența radiației.

IX.1.1. Spectre atomice și moleculare

Spectrele se împart în două categorii:

- 1) de emisie
- 2) de absorbție.

Ambele categorii pot fi spectre continue și spectre de linii sau de benzi. Între spectrul de emisie și cel de absorbție există o corespondență directă exprimată de asemenea prin legea lui Kirchhoff conform căreia orice substanță absoarbe aceleași radiații pe care, în aceleași condiții de temperatură și presiune, le poate emite. Spectrele de linii sunt emise de atomi în stare liberă, în anumite condiții (descărcări în gaze, flacără).

Atomii emit unde electromagnetice cu anumite lungimi de undă (în special în domeniul vizibil și ultraviolet), lungimi de undă care nu depind de condițiile de producere ale emisiei ci sunt caracteristice fiecărei specii atomice.

Spectrele optice se datoresc tranzițiilor atomice cuantificate între anumite nivele de energie bine determinate.

Emisia unui foton este legată de trecerea unui electron dintr-o stare energetică în alta, tranziția având loc numai dacă sunt îndeplinite anumite condiții (reguli de selecție). Liniile spectrale emise de o specie atomică se grupează, după anumite regularități, în serii spectrale. Exemplul cel mai simplu îl oferă spectrul hidrogenului.

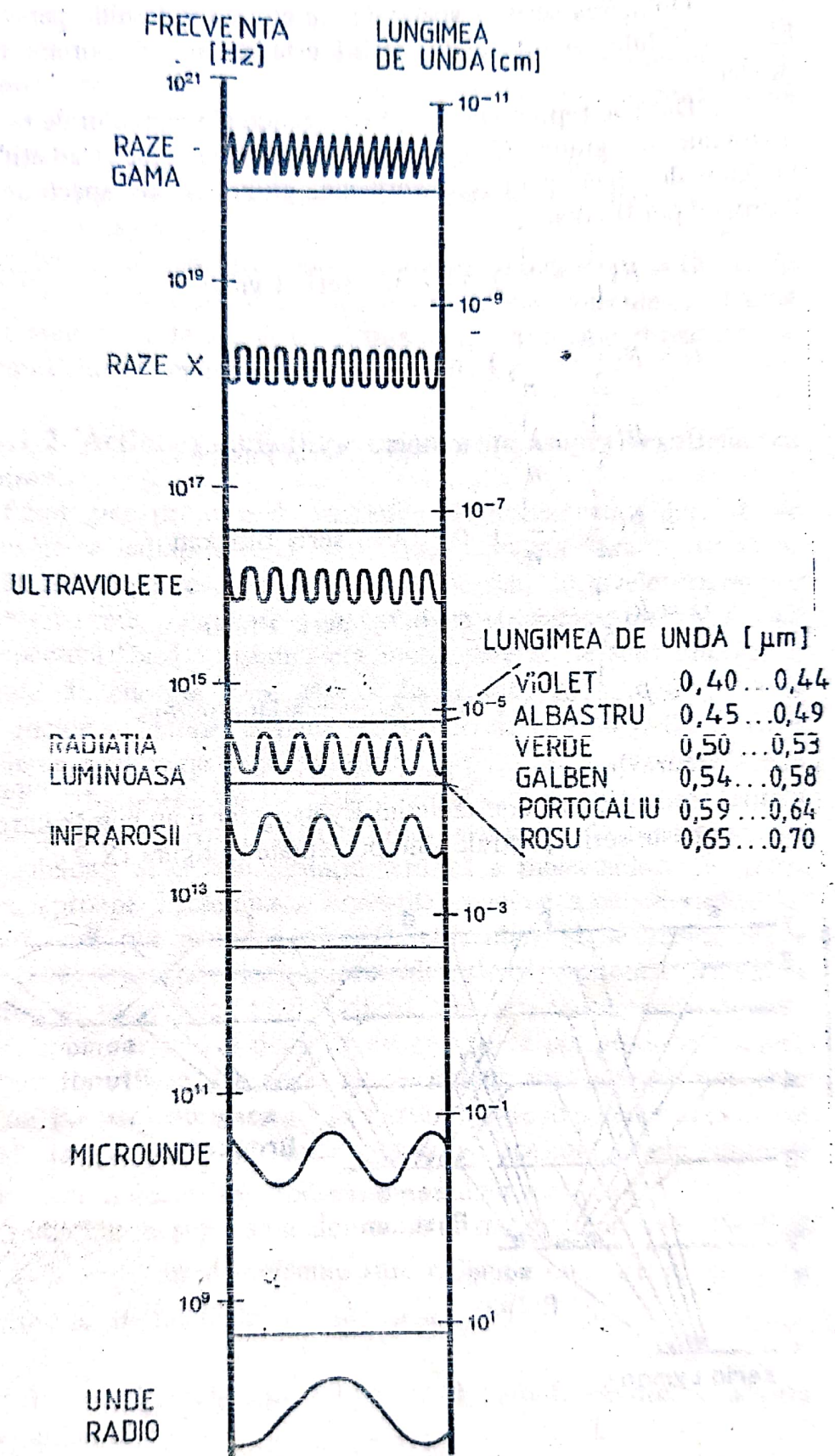


Fig.IX.1

Hidrogenul la presiune joasă (10^{-1} - 10^{-2} torr) supus descărcărilor electrice într-un tub, emite un spectru care se observă pe o placă fotografică după ce lumina emisă este descompusă cu ajutorul unei prisme sau rețele de difracție.

Obținerea seriilor spectrale ale atomului de hidrogen a fost explicată pe baza modelului atomic al lui Bohr (este cel mai important rezultat al acestui model)

Dacă se reprezintă stările energetice ale atomului de hidrogen prin liniile orizontale (diagrama Grotrian) iar liniile spectrale (radiațiile de o anumită lungime de undă) prin linii verticale, atunci seriile spectrale ale atomului de hidrogen pot fi notate:

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n=2,3,\dots \text{seria Lyman}$$

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n=3,4,\dots \text{seria Balmer}$$

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n=4,5,\dots \text{seria Paschen}$$

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n=5,6,\dots \text{seria Brackett}$$

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n=6,7,\dots \text{seria Pfund}$$

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n=7,8,\dots \text{seria Humphreys}$$

unde $\tilde{\nu}$ reprezintă numărul de undă ($\tilde{\nu} = 1/\lambda$), λ fiind lungimea de undă a radiației emise, R este constanta lui Rydberg iar n un număr întreg.

Aceste serii spectrale sunt prezentate în figura IX.2

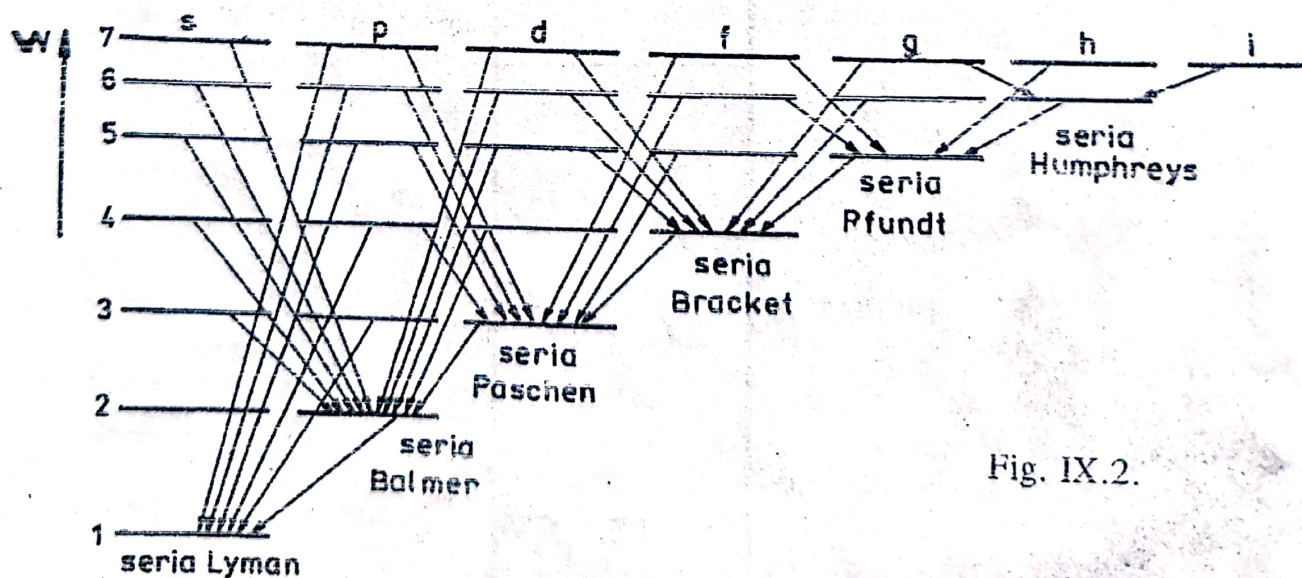


Fig. IX.2.

Toate aceste serii spectrale au fost observate experimental și valorile lungimilor de undă componente arată că seria Lyman este situată în regiunea ultravioletului îndepărtat, seria Balmer este în vizibil și parțial în ultravioletul apropiat, iar seriile Pachen, Brackett și Pfund în infraroșu. Facem observația că valorile experimentale sunt în bună concordanță cu valorile calculate după modelul atomic al lui Bohr.

Natura acestor spectre demonstrează existența stărilor de energie cuantificată în atom și posibilitatea schimbului cu exteriorul a unor cuante de energie, la tranzițiile atomilor dintr-o stare în alta.

Spectrele de benzi sunt spectre moleculare care se datoresc mișcărilor de rotație ale moleculelor și mișcărilor de oscilație ale atomilor moleculelor. Faptul că și aceste spectre sunt discrete atestă că și mișcărilor de rotație și oscilație le corespund stări cuantificate de energie.

IX.1.2. Acțiunea radiațiilor neionizante asupra organismului animal.

Efectele fiziologice produse de radiațiile electromagnetice depind de modul cum sunt absorbite radiațiile electromagnetice. Condiția ca radiațiile să fie absorbite este ca în substanța respectivă să existe perechi de nivele energetice care să fie separate energetic tocmai de valoarea energiei transportată de fotonii ce lovesc ținta respectivă. Dacă substanța are multe perechi de stări energetice astfel încât diferența de energie între ele să fie tocmai $\Delta E = h\nu$, ν fiind frecvența radiației incidente, atunci radiația va fi puternic absorbită. Dacă astfel de perechi de nivele energetice nu există, atunci radiația nu va fi absorbită.

Microundele și radiofrecvențele sunt puțin absorbite deoarece energiile acestor fotoni sunt destul de mari pentru a produce mișcări de rotație sau de torsiune ale moleculelor; și numai agitația termică a moleculelor, de aceea aceste radiații trec aproape neatenuate. Energiile cuantice asociate radiațiilor infraroșii au valori care pot provoca vibrații moleculare și de aceea aceste radiații sunt mai puternic absorbite decât microundele de către țesuturi. Radiațiile din domeniul vizibil și ultraviolet rezultă după cum am văzut, prin trecerea atomului în diferite stări energetice deci ele au energii ce pot produce tranziția electronilor pe orbite superioare. De aceea aceste radiații sunt puternic absorbite și în general ele nu pot străbate pielea. În cazul în care frecvența crește mai mult, ajungându-se la radiațiile X sau γ , energia acestora poate produce distrugerea atomilor sau moleculelor producând ionizarea acestora.

De aceea radiațiile X și γ , sunt denumite și radiații ionizante. Pe lângă aceste radiații X și γ , tot radiații ionizante sunt radiațiile nucleare α și β (și radiațiile γ sunt emise tot de nucleele atomice ca și cele α și β).

IX.1.2.1. Efectele microundelor și radiofrecvențelor asupra organismelor.

Efectele terapeutice ale microundelor și radiofrecvențelor sunt bazate pe faptul că acestea penetrează corpul și ridică temperatura părții din corp care este

expusă radiației. De aceea aceste radiații servesc pentru ameliorarea durerilor musculare sau osoase precum și în alte cazuri în care încălzirea în adâncime a țesuturilor este folositoare. Deși aceste radiații, după cum am arătat mai sus, nu produc modificări chimice în corp, totuși ele pot produce arsuri interne la o expunere excesivă sau arsuri superficiale dacă elementele de transmisie sunt în contact cu pielea.

IX.1.2.2. Efectul radiațiilor infraroșii asupra organismelor.

Fizica proceselor de emisie a radiațiilor a arătat că orice corp aflat la o temperatură superioară lui 0 K emite radiații electromagnetice (legea lui Kirchhoff), radiații care constituie radiația termică. Domeniul infraroșu al spectrului undelor electromagnetice formează o parte a radiației termice.

Corpul omului, aflat la o temperatură medie de 37°C este și el un emițător de radiații care are maximum în domeniul infraroșu. De aceea se poate obține o imagine a corpului omenesc folosind detectori sensibili de radiații infraroșii. Această tehnică de diagnostic este **termografia în infraroșu**.

Utilizarea termografelor permite detectarea cancerului întrucât temperatura tumorii este cu 1 - 2 °C mai mare decât cea a țesuturilor normale (au fost raportate chiar și diferențe de temperatură de 5°C). Termografele au fost utilizate și pentru analiza vitalității diferitelor tipuri de grefe de piele, examinarea degerăturilor, etc.

Acțiunea radiațiilor infraroșii este îndeosebi calorică. Dacă acțiunea radiațiilor infraroșii este de scurtă durată, acestea stimulează activitatea celulelor și țesuturilor. La o acțiune mai îndelungată însă, se produce alterarea sau chiar distrugerea celulelor. Radiațiile infraroșii nu pătrund adânc în corpuri și de aceea nu sunt utilizabile când este necesară încălzirea țesuturilor în adâncime. Ele se folosesc însă la fotografierea în infraroșu, necesară în scopuri de diagnostic. Astfel, ele se folosesc la fotografierea venelor și a altor structuri aflate sub piele care sunt invizibile pentru ochi. Fotografiiile în infraroșu sunt utilizate și pentru diagnostic în anumite boli ale ochiului. Radiațiile infraroșii sunt reținute de piele și astfel se produce încălzirea ei. De aceea ele sunt folosite la lămpile cu radiații infraroșii utilizate în terapia pe bază de căldură. Prin încălzire activitatea nervoasă a pielii este stimulată, contribuind la calmarea durerilor. Iradirea moderată activează și glandele sudoripare, accelerează formarea pigmentilor și regenerarea celulelor epidermice. Acțiunea îndelungată a radiațiilor infraroșii produce însă arsuri sau eriteme, la nivelul pielii iar în cazul expunerii ochiului neprotejat poate duce la cataractă sau chiar la dezlipire de retină.

IX.1.2.3. Efectul radiațiilor luminoase asupra organismelor.

Domeniul cel mai important al spectrului undelor electromagnetice, îl constituie domeniul vizibil. După cum am arătat deja, în starea liberă atomii emit, în anumite condiții, (tuburi de descărcare, flacără), radiații luminoase formând spectre discontinue. Sursa cea mai importantă de radiații luminoase o constituie Soarele. Radiațiile luminoase servesc la transmiterea de informații și ca semnalizator între indivizi. Lumina, culoarea, sunt aspecte percepute cu

ajutorul ochiului; ea condiționează viața, dezvoltarea și perpetuarea organismelor animale

Astfel, există animale care se orientează către lumină (fluturi și păianjeni). Fenomenul se numește fototropism pozitiv spre deosebire de fototropismul negativ care se manifestă la animale care fug de lumină, așa cum sunt păsările de noapte. La unele animale, cum sunt unele specii de pești și cameleonul, lumina determină o schimbare a culorii pielii prin deplasarea pigmentului de la suprafața pielii.

Lumina are importanță în realizarea unor procese vitale pentru existența omului, a plantelor și animalelor.

Plantele, în prezența luminii, realizează procesul de fotosinteză, proces indispensabil vieții acestora.

Pentru oameni și animale, în afara procesului vederii, radiațiile luminoase produc efecte considerabile. Lumina are efecte pozitive în ceea ce privește procesele metabolice din organism. Lumina produce creșterea numărului de eritrocite deci și a hemoglobinei din sânge iar plasma își îmbogățește conținutul în fosfor, calciu, în detrimentul glucozei. Lipsa luminii, chiar când animalele primesc o hrană corespunzătoare, face ca acestea să devină din ce în ce mai debile și apoi mor. În cazul iluminării insuficiente, lipsa vitaminelor A și D conduce la apariția rahitismului (Rahitismul se manifestă foarte grav la copii).

Acțiunea prelungită a luminii poate produce însă și fenomene negative. Iradierea prelungită cu lumină cu lungimi de undă de 400-500 nm produce asupra pielii eriteme, iar asupra ochilor, conjunctivite. Lumina acționează și asupra sistemului nervos, producând la păsări, de exemplu, chiar și în condițiile extirpării ochilor, o modificare a ciclului lor sexual.

IX.2. Acțiunea radiațiilor ionizante asupra organismelor

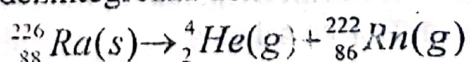
IX.2.1. Dezintegrarea radioactivă. Radiațiile nucleare.

În anul 1896 H. Becquerel a observat că mineralele de uraniu și compușii care conțin uraniu, emană radiații invizibile care :

- descarcă un electroscope ;
- străbat foițe metalice subțiri ;
- impresionează placa fotografică ;
- provoacă fluorescența unor substanțe ;
- ionizează gazele din jur ;
- sunt deviate în câmpuri electrice sau magnetice ;
- provoacă reacții nucleare ;
- produc efecte diferite de ionizare biologice sau radiochimice.

În anul 1903 E. Rutherford și Soddy au efectuat o experiență prin care au demonstrat că radioactivitatea este legată de transformarea prin dezintegrare a atomilor unui element în atomii altui element.

În acest scop au utilizat ca substanță radioactivă un preparat de radium care se dezintegrează astfel :



Radiațiile nucleare sunt acele radiații, denumite α, β, γ care sunt emise de nucleele atomice. Energia acestor radiații este mare, ele produc ionizări și de aceea sunt clasificate, împreună cu radiațiile X, în categoria radiațiilor ionizante.

IX.2.2. Tipuri de radiații nucleare

S-a constatat, imediat după descoperirea radioactivității, că radiația α este de natură corpusculară (o particulă α este identică cu nucleul de He) radiația β , tot de natură corpusculară, constă dintr-un flux de electroni (e^{-}) pentru radiația β^{-} sau de pozitroni (e^{+}) pentru β^{+} , iar radiația γ este de natură electromagnetică, având lungimi de undă cuprinse între 10^{-10} - 10^{-15} m.

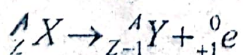
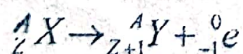
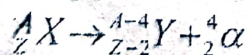
Radiațiile α , (${}^4_2\text{He}$), expulzate de nucleele atomilor radioactivi cu viteza de $1,4 \cdot 10^7$ - $2,0 \cdot 10^7$ ms^{-1} și energii de 2-9 MeV au un spectru monoenergetic, capacitate mare de ionizare a gazelor și putere de penetrație foarte mică. Sarcina electrică a particulelor α a fost determinată în 1908 de către Rutherford și a fost găsită de două ori mai mare și de semn contrar decât cea a electronului.

Radiațiile β , care se propagă cu viteze foarte mari ($1,3$ - $2,9 \cdot 10^8$ m/s) posedă energii de la 0,017 MeV până la 16 MeV și un spectru energetic continuu. Capacitatea de ionizare este mai mică decât cea a radiațiilor α iar puterea de penetrare mai mare. Sarcina electrică a particulelor β a fost determinată de Becquerel și de Kaufmann care au dedus că este egală cu sarcina electrică a electronului. Radiațiile γ sunt de natură electromagnetică, cu lungimea de undă cea mai mică în spectrul undelor electromagnetice (Fig. IX.1) și cu putere de penetrație foarte mare. Au proprietăți asemănătoare cu lumina: se reflectă, refractă, difractă și interferă. Neavând sarcină electrică nu sunt deviate în câmp electric sau magnetic.

IX.2.3. Legile dezintegrării radioactive

Fenomenul de dezintegrare radioactivă (sau de radioactivitate) constă deci în transformarea unor nuclee instabile în alte nuclee mai stabile, însoțită de emisie de particule radioactive.

Prin dezintegrări radioactive, nucleele își schimbă structura, după cum urmează:



(IX.2)

Radiațiile γ însoțesc radiațiile α și β , dar pot apare și singure; fotonii γ având sarcină și masă de repaus nule, nu schimbă izotopul primar, dacă dezintegrarea γ nu este însoțită de alte dezintegrări radioactive.

Ulterior s-a descoperit o posibilitate de transformare nucleară, care are loc prin captarea de către nucleu a unuia din electronii de pe stratul K, ducând la schimbarea structurii nucleului în mod asemănător cu schema



Relațiile (IX.2) și (IX.3) sunt cunoscute sub denumirea de **legile deplasării** nucleelor, deoarece în urma dezintegrărilor, izotopii care le suportă se deplasează cu una, două căsuțe în sistemul periodic al elementelor.

Dezintegrarea radioactivă este un fenomen statistic și nu s-a descoperit pînă în prezent, vreo posibilitate de influențare a ritmului în care au loc.

Numărul de nucleee dN care se dezintegrează într-un timp dt este proporțional cu numărul total N de nucleee de tipul respectiv din preparat și cu intervalul de timp dt

$$dN = -\lambda N dt \quad (\text{IX.4})$$

În relația (IX.4) λ este constanta de dezintegrare și este o caracteristică a fiecărei specii nucleare. Semnul $-$ indică o scădere a numărului de nucleee care se dezintegrează pe măsură ce timpul crește.

Dacă la momentul inițial $t_0=0$, preparatul conținea N_0 nucleee radioactive, numărul de nucleee radioactive care se mai află în preparat după timpul t (adică numărul de nucleee rămase nedezintegrate) se obține din relația (IX.4) prin integrare

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (\text{IX.5})$$

Aceasta este legea **dezintegrării radioactive**.

Timpul $T_{1/2}$ după care numărul de nucleee rămase nedezintegrate scade la jumătate se obține imediat din (IX.5), dacă se ia $N=N_0/2$. Se găsește imediat că

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (\text{IX.6})$$

Acesta este timpul de înjumătățire și, la fel ca și la constanta de dezintegrare λ , este o caracteristică a fiecărei specii nucleare. Există izotopi radioactivi cu timpi de înjumătățire foarte mici (de exemplu izotopul ${}^{214}_{84}\text{Po}$ are $T_{1/2}=3 \cdot 10^{-7}\text{s}$) sau din contră, foarte mari (se estimează că izotopul ${}^{144}_{60}\text{Nd}$ are $T_{1/2}=5 \cdot 10^{15}\text{ani}$).

În tabelul IX.1. prezentăm timpii de njumătățire și radiația emisă pentru cîțiva radionuclizi

Tabelul IX.1

Element	$T_{1/2}$	Radiația emisă
Hidrogen	12 ani	β
Carbon	5730 ani	β
Fosfor	14 zile	β
Potasiu	$1,28 \cdot 10^9$ ani	β și γ
Cobalt	5 ani	β și γ
Stronțiu	28 ani	β
Iod	8 zile	β și γ
Cesiu	30 ani	β
Radiu	1600 ani	α și γ
Uraniu	$7,1 \cdot 10^8$ ani	α și γ
Plutoni	24.400 ani	α și γ

Relația (IX.5) indică faptul că în orice moment, oricât de îndepărtat de cel inițial (al obținerii preparatului radioactiv) mai există nuclee nedezintegrate:

Numărul de nuclee dezintegrate în unitatea de timp

$$\Lambda = \left| \frac{dN}{dt} \right| \quad (\text{IX.7})$$

se numește **viteză de dezintegrare** sau activitate radioactivă.

Utilizând relația (IX.4), (IX.7) devine

$$\Lambda = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \quad (\text{IX.8})$$

Viteza de dezintegrare scade exponențial în timp; combinând (IX.8) cu (IX.5), se obține imediat

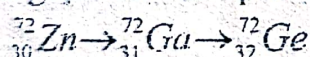
$$\Lambda = \Lambda_0 \exp(-\lambda t) \quad (\text{IX.9})$$

Viteza de dezintegrare se măsoară în dezintegrări pe secundă.

Unitatea de măsură pentru viteza de dezintegrare (activitatea radioactivă) în Sistemul Internațional de Unități (SI) este denumită **Becquerel (Bq)** și ea reprezintă 1 dezintegrare pe secundă.

Se tolerează ca unitată de măsură a activității radioactive, cea denumită Curie, egală cu $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$ dezintegrări pe secundă și definită ca activitatea (în particule α) a unui gram de ^{226}Ra pur, proaspăt preparat. ($1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$ Bq). Aceasta este o activitate foarte mare, periculoasă pentru om, chiar și la un timp de expunere scurt.

Adeseori nucleele obținute prin dezintegrări radioactive sunt la rîndul lor instabile și suferă de asemenea dezintegrări radioactive. Aceștia sunt nuclizi genetic legați. Un exemplu este dat de dezintegrarea în lanț



cu timpi de înjumătățire de 49 ore și respectiv 14,1 ore.

IX.2.4. Sisteme și unități de măsură pentru dozele de radiații

Pentru măsurarea efectelor biologice produse de radiațiile ionizante se folosesc două sisteme de măsură:

- 1) sistemul roengenologic
- 2) sistemul radiobiologic

1) **Sistemul roengenologic** are la bază faptul că ionizarea produsă de radiațiile ionizante într-o anumită masă de aer este determinantă pentru acțiunea biologică a radiațiilor X și γ , indiferent de frecvența lor. (acest sistem se folosește numai pentru radiațiile X și γ pînă la o energie de 3 MeV)

Ca mărime de bază în sistemul roengenologic este doza de ioni

Doza de ioni se definește ca sarcina electrică totală a ionilor de un anumit semn produși de radiația incidentă într-un Kg de aer uscat la 0°C și presiune atmosferică normală.

$$I = \frac{dQ}{dm}$$

Unitatea de măsură este coulomb/Kg.

O unitate tolerată folosită este **Roentgen-ul**.

1Roentgen este intensitatea radiației care produce prin ionizare o sarcină electrică de $2,58 \cdot 10^{-4}$ Coulombi într-un Kilogram de aer. Această unitate nu este însă aplicabilă, după cum am arătat, pentru radiații α sau β .

2) **Sistemul radiobiologic** se bazează pe măsurarea energiei absorbită de țesut și este folosit pentru evaluarea efectelor biologice produse de orice radiație ionizantă. Acest sistem introduce trei mărimi:

- a)-doza de energie
- b)-efectivitatea biologică relativă
- c)-doza biologică

Doza de energie(D) reprezintă energia transferată prin interacțiune unității de masă din mediul iradiat

Unitatea pentru doza de energie absorbită de corpuri este **rad-ul (roentgen absorbed dose)** și reprezintă doza care transferă o energie de 0,01 Jouli unui Kg de țesut (această unitate este folosită de obicei în aplicații clinice). În SI unitatea pentru doza de energie este denumită Gray(Gy)

$$1\text{Gy} = 100 \text{ rad.}$$

Efectivitatea biologică relativă η se referă la efectele diferitelor tipuri de radiații în raport cu efectele produse de radiația standard care este radiația Roentgen de 200KW. De exemplu efectivitatea biologică relativă este:

$$\eta = 1 \text{ pentru radiații } \gamma \text{ și } \beta$$

$$\eta = 20 \text{ pentru radiații } \alpha$$

Doza biologică de radiații(B) este definită prin relația:

$$B = \eta D$$

Pentru doza biologică de radiații este folosită se folosește unitatea denumită simbolic **rem(roentgen-equivalent-man)**

Pentru radiații X și γ , care sunt cel mai mult utilizate în medicină, $\eta = 1$ și deci rad-ul este echivalent cu rem-ul. Unitatea în SI pentru măsurarea dozelor biologice ale radiațiilor este Sievert(Sv), care este doza de energie măsurată în Gy amplificată cu efectivitatea biologică.

$$1\text{Sv} = 100 \text{ rem.}$$

IX.2.5. Efectul radiațiilor ionizante asupra funcțiilor celulare

Radiațiile ionizante produc o modificare a permeabilității membranelor biologice. Există rezultate care arată că, sub influența radiațiilor ionizante, se schimbă echilibrul ionic (crescând permeabilitatea pentru apă și electroliți) ceea ce are ca rezultat modificarea raportului ionilor de K și Na. Testele au arătat că se produc modificări atât în transportul activ cât și în cel pasiv, modificându-se puternic potențialul de repaos al membranelor celulare. De asemenea, în astfel de cazuri, substanțele cu masă moleculară mare pot penetra, în mod anormal, membrana. Aceste procese influențează starea proteinelor intracelulare, activitatea enzimelor și deci funcția fiziologică a celulei. Se întâlnesc și cazuri

când se produce o scădere a coeficientului de difuziune și o creștere a celui de sedimentare.

Sub acțiunea radiațiilor ionizante se produce o modificare a funcțiilor celulare. Astfel, pentru doze mici de radiații, masa celulelor crește la început datorită apariției unor celule uriașe, după care scade din nou.

Un alt efect este întârzierea mitozei la doze mici și suprimarea ei la doze mari. Radiosensibilitatea celulei variază în diferitele etape ale diviziunii celulare. În sfârșit, la doze mari de radiații, apare moartea celulară imediată sau întârziată.

Dozele puternice de radiații produc la om și la mamifere edeme tisulare care apar datorită acumulării apei în spațiul extracelular. De asemenea se produc leziuni capilare datorită scăderii volumului plasmei ca urmare a creșterii permeabilității vaselor sangvine.

IX.2.6. Efectul radiațiilor ionizante asupra diferitelor organe

Inima și vasele mari de sînge sunt rezistente la radiații, atât funcțional cât și morfologic, pe când capilarele, după cum am spus mai înainte, sunt afectate, prezintă tulburări funcționale la început, iar mai târziu modificări histologice.

La iradiere apar modificări electrocardiografice însoțite de hipertensiune, modificarea greutatei (rezultatele arată că se produce o scădere a cantității de AND). Sistemul respirator este și el relativ radiorezistent. La iradierea căilor superioare se produce o hiposecreție a mucoaselor, urmată de leziuni de tip inflamator, edeme. La nivelul tubului digestiv, dozele slabe afectează secreția de substanțe și enzime necesare procesului de digestie. Dozele mai ridicate produc ulceratii ale mucoasei intestinale, dănd posibilitatea bacteriilor din intestin să treacă în sânge. În ceea ce privește sistemul osos, chiar de la începutul studiilor efectelor iradierii, au fost observate modificări osoase la om și animale, în special la tineri. Aceste modificări constau în oprirea procesului de osificare și creștere, iar la doze mai mari de 1000 remi, necroza osoasă.

Efectele radiațiilor la nivelul pielii sunt și ele în funcție de doze și de timpul de acțiune. La doze mici apar eriteme, apoi apar pigmentații iar la doze mari apar radiotermita ce se pot ulcera sau se pot transforma în tumori maligne.

IX.2.7. Efectul radiațiilor ionizante asupra glandelor endocrine și sistemului nervos central

Tiroida este radiorezistentă dar sensibilitatea crește în hipertiroidie. Sistemul glandular hipofizo-suprarenalian răspunde diferit la radiații în funcție de doză. Hipofiza are o mare radiorezistență (doze de circa 2000 R aplicate pe capul animalelor nu produc modificări histologice). Iradierea produce creșterea sau micșorarea secreției hormonilor specifici iar oprirea totală a eliberării de hormoni se produce la doze foarte mari. În schimb, glandele suprarenale sunt sensibile la acțiunea radiațiilor ionizante.

O radiosensibilitate foarte mare o au gonadele, atât cele masculine cât și cele feminine. La om iradierea cu circa 600 R duce la încetarea activității endocrine și sterilitate. Și la animale la doze de 200-800 R după câteva zile dispar spermatozoizii. Ovariele animalelor iradiate prezintă degenerescențe celulare și foliculare. Astfel iradierea cu circa 300-600 R duce la expulzarea și distrugerea, după câteva zile, a ovulelor. După iradiere ovarele animalelor devin fibroase, cu chisturi și se produce sterilitate persistentă.

Iradierea capului sau a întregului organism produce modificări fiziologice și chimice, deși mult timp a existat părerea că sistemul nervos este foarte rezistent (datorită faptului că nu se înregistrează decât modificări morfologice). Doze mici de radiații produc tulburări în activitatea bioelectrică a cortexului cerebral (deci se modifică electroencefalograma), iar la doze mari apar rupturi de axoni sau modificări în teaca de mielină.

Explicația acestor efecte este, conform ipotezei Loutit, că iradierea celulelor provoacă dereglarea sau blocarea pompei de Na. Acest fapt poate determina o concentrație mai mare de K în celulele nervoase, modificându-se raportul K/Na, ceea ce cauzează dereglări funcționale. Reacția organismului animal la iradiere este apariția unor simptome ca greața, voma, hiperactivitatea.

IX.2.8. Efecte genetice ale radiațiilor ionizante.

Aberațiile cromozomiale produse de radiații reprezintă unul dintre efectele cele mai grave din punct de vedere al consecințelor. După Sax și Lea aberațiile cromozomiale se produc datorită ruperii cromozomilor care au fost supuși iradierii. Cromozomul poate reveni la structura originală (fenomen denumit restituție) sau fragmentele pot rămâne în mod permanent. În alte cazuri se pot produce rearanjamente care determină de asemenea aberații cromozomiale.

Aberațiile cromozomiale nu periclitizează viața celulei ci dau naștere la **mutații cromozomiale** (indiferent dacă apar spontan sau sunt produse de substanțe mutagene). Acestea pot fi clasificate după cum urmează:

- 1) delețiile, care sunt pierderi de segmente de la capetele sau din interiorul cromozomului
- 2) duplicațiile, ce reprezintă dublarea unor segmente din cromozomi
- 3) inversiile, care sunt inversiuni de 180° ale unor segmente
- 4) translocațiile, care apar prin unirea unui fragment lateral al cromozomului, cu unul central.

În anul 1927 H.G. Muller pune în evidență, pentru prima dată, efectul mutagen al radiațiilor ionizante la *Drosophila melanogaster*. Mutatiile sunt modificări ireversibile ale materialului genetic, induse de diverși factori fizici (dintre care radiațiile ionizante ocupă un rol esențial), chimici și biologici. Prin mutant se înțelege individul care se deosebește prin caracterile sale modificate, de indivizii din care a făcut parte. Mutatiile pot fi naturale (spontane) și artificiale (induse). Efectele genetice ale radiațiilor ionizante sunt dependente de doză, de tipul radiației ionizante, viteza diviziunii celulare, numărul și lungimea cromozomilor, reversibilitatea leziunilor cromozomiale etc.

Cercetările în domeniul radiogeneticii animale au ca scop atât descoperirea unor mecanisme ale radiomutagenzei cât și obținerea unor mutații cu o valoare economică mare. Astfel japonezul Tazima a descoperit un mutant la viermele de mătase care are un randament sporit în producerea mătăsii. Iradierea a fost folosită și pentru combaterea insectelor dăunătoare iradiind masculii cu doze mari pentru a-i steriliza.

IX.2.9. Evaluarea efectele radiațiilor ionizante în scara animală

Efectele radiațiilor ionizante sunt foarte diferite în scara animală.

Dacă la om doza de 600 R este letală, la șoarece este de 900 R iar pentru distrugerea unor bacterii sunt necesare doze de mii sau chiar milioane de R. Efectele biologice ale radiațiilor variază în funcție de condițiile de iradiere (internă sau externă, totală sau locală etc.)

Pentru aprecierea radiorezistenței diferitelor specii, se utilizează **doza semiletală** care este doza ce provoacă moartea a 50% din indivizii unei populații. Când efectul se urmărește în timp de n zile, doza semiletală se exprimă în funcție de numărul zilelor.

În tabelul IX.2 se prezintă dozele semiletale (raze Roentgen) pentru $n=30$ zile, D50/30 pentru diferite specii.

Tabelul IX.2

Specia	Media D50/30
Amibă	100.000
Broască	700
Păsări	1000
Iepure	800
Sobolan	665
Liliac	15.000
Câine	315
Maimuța	550
Om	400

Se observă din acest tabel că există o mare variație a dozelor semiletale în funcție de specii. De asemenea sensibilitatea la radiații nu crește cu gradul de evoluție a speciei, totuși se observă că organismele superioare au o radiorezistență mai mică. Până în prezent nu s-au putut stabili cu precizie factorii care determină această sensibilitate, dar esențial în acest proces este AND-ul (ipoteză concordă cu datele referitoare la variația radiorezistenței în diferite stadii ale dezvoltării speciilor).

Aceasta este explicația pentru faptul că unele organe cum sunt timusul, măduva osoasă, glandele sexuale, ganglionii limfatici, care au o radiosensibilitate mare conțin și o cantitate mai mare de AND. După cum am arătat, pentru om, cele mai sensibile structuri din corp sunt cele care produc sânge, cele sexuale precum și ochii iar la nivelul celulelor cele mai sensibile sunt țesuturile limfatice, epiteliale și din măduva osoasă. De asemenea, modificări în

compoziția sîngelui cum ar fi reducerea numărului de leucocite sunt procese care au efecte nefaste asupra vieții omului. Din acest motiv, cele mai grave efecte ale iradierii sunt următoarele :

- 1)afectarea organelor hematopoetice cu modificări esențiale în hemogramă ;
- 2)radiotermite precoce sau tardive ;
- 3)sterilitatea feminină prin suprimarea menstruației la femei și prin azoospermie la bărbați ;
- 4)afectarea cristalinului și producerea cataractei ;
- 5)malformații ale embrionului
- 6)tumori maligne

Agencia pentru Protecția Mediului a recomandat ca limită maximă pentru expunerea la radiații(alta decît cea naturală sau de interes medical în diagnostic) valoarea de 0,17 rem/an pentru om și de 5 mrem/an pentru plante.

Prezentăm, în tabelul IX.3 și dozele de radiații ce produc principalele efecte nefaste asupra omului .Aceste doze au fost preluate în carte după Molly: M. Bloomfield"Chemistry and Living Organism,(1992), John Wiley & Sons, Inc. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore :

Tabelul IX.3

Doza(rem)	Efect
25 -50	Nu sunt efecte măsurabile
100	Slabe modificări în sînge
100 - 200	Modificări semnificative ale sîngelui
450	Moarte la circa 50% din populația iradiată
800-1000	Moarte 100% a populației iradiate

IX.3. Diagnosticul și terapia cu radioizotopi

Dezvoltarea unor detectori sensibili de radiații au permis utilizarea unor izotopi radioactivi ca trasori pentru diagnostic.Pentru aceasta se sintetizează molecule marcate ce au în compoziția lor, unul sau mai mulți atomi radioactivi care însă nu schimbă comportarea lor chimic.Organismul viu tratează trasorul ca pe un constituent normal dar atomul radioactiv face posibilă urmărirea compusului respectiv prin sistem.

Pentru prima dată trasorii au fost folosiți în 1923 de Georg Hevesy. Această tehnică a permis dezvoltarea unor metode de studiu cinetic al circulației, pentru măsurarea vitezelor și debitelor circulatorii. De asemenea utilizarea atomilor marcați a permis studiul cantitativ al metabolismului celor mai multe elemente din corpul omenesc.(circulația și repartiția cantitativă a Na, K, Ca, P etc. între diferite organe ale corpului omenesc).

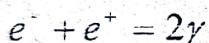
S-au realizat explorări medicale morfologice prin tehnici de autoradiografie, scintigrafie etc.

Facem observația că utilizarea radioizotopilor ca trăsori pentru diagnostic este total diferită de cea pentru tratament (doza expunerii la radiații pentru diagnostic este de un milion de ori mai mică decât în cazul tratamentului; ea este de ordinul milireimilor pentru diagnostic dar poate atinge ordinul mililor de remi în cazul procedurilor terapeutice). Atomii radioactivi sunt folosiți în medicină nu numai pentru diagnostic, ci au și aplicații terapeutice legate de locul unde aceștia se fixează. Cercetarea biologică și terapia medicală folosesc efectele radiațiilor ionizante în tratamentul tumorilor maligne, care are ca scop distrugerea selectivă și completă a populațiilor de celule canceroase.

Metode interesante de diagnostic în medicina nucleară s-au dezvoltat după 1980. În anul 1979 Allan Cormack și Godfrey Hounsfield (laureați ai premiului Nobel pentru medicină) au descoperit tomografia cu raze X denumită **Computerized Axial Tomography Scanner**, denumită în prezent CT scanner.

Imaginile date de computer au diferite culori și reprezintă diferitele tipuri de țesuturi. Cu ajutorul acestei tehnici medicii pot identifica și localiza, pe domenii de fracțiuni de milimetru, tumori canceroase, hernii ale discului sau obstrucții ale ductului biliar. Această metodă a fost îmbunătățită folosindu-se și unele aspecte legate de metoda trasorilor radioactivi, ajungându-se la **tomografia cu emisie de pozitroni**.

Unii radioizotopi cum sunt C^{11} , N^{13} , O^{15} se dezintegrează prin emisie de pozitroni. Când pozitronul este direcționat într-un lichid sau solid, el interacționează repede de un electron și are loc reacția de anihilare a perechii electron-pozitron obținându-se doi fotoni γ după reacția:



Cei doi fotoni γ sunt emiși în direcții opuse și de aceea se folosesc doi detectori plasați la 180 grade unul de celălalt. Detecția sincronizată impune o tehnică performantă pentru a se elimina sursele parazite. Tomografia cu emisie de pozitroni (PET) se folosește în special în studiile privind activitatea creierului.

Medicii utilizează metoda PET pentru analiza creierului în cazul bolilor Alzheimer sau Parkinson sau în cazul afecțiunilor mentale. Deși metodele expuse mai sus sunt mult utilizate în medicină, ele au dezavantajul că expun corpul la radiații ionizante. O altă metodă dezvoltată după anul 1980 pentru a se obține imagini ale corpului, se bazează pe Rezonanța Magnetică Nucleară și este denumită **Magnetic Resonance Imaging (MRI)**. MRI este folosită acolo unde celelalte metode nu sunt eficace, pentru diagnosticul tumorilor din creier, pentru detectarea sclerozei multiple, precum și a unor defecte din naștere.

IX.4. Protecția împotriva radiațiilor ionizante

Protecția împotriva efectelor nocive ale radiațiilor ionizante se poate face în mai multe feluri:

a) **protecția fizică** ce se realizează prin: creșterea distanței față de sursă, micșorarea timpului de staționare în apropierea sursei și plasarea în fața sursei a unor ecrane de protecție. În ceea ce privește ecranarea, aceasta este foarte diferită în funcție de tipul radiației ionizante.

Dacă particulele α sunt oprite cu ajutorul mănușilor de cauciuc, radiațiile β sunt oprite de materiale cu procent mare de H(bachelită, materiale plastice), radiațiile X și γ sunt atenuate doar de ecrane din metale grele, în special plumbul(se mai folosesc și ecrane din beton).

b) **protecția chimică** ce se realizează cu substanțe care măresc radiorezistența organismului.

c) **protecția biochimică** ce se asigură prin preparate biologice active care diminuează efectul nociv al radiațiilor și favorizează refacerea celulară;

d) **protecția biologică** se face prin introducerea în organism a unor celule viabile care favorizează refacerea funcției hematopoetice, care sunt foarte grav afectate de radiații.

Am arătat în cele prezentate mai sus că efectele moleculare, asupra celulelor și a diferitelor organe ale radiațiilor nucleare și ale radiațiilor X sunt bine cunoscute. De asemenea sunt înțelese și efectele biologice acute ale dozelor mari de radiații. Efectul pe termen lung al dozelor joase de radiații este o problemă mult mai dificilă. Faptul că aceste doze de radiații se cumulează în timp sau că efectul acestora se manifestă la mult timp după expunere sunt de asemenea niste probleme în studiu.

Intrebarea care se pune insistent este dacă există o doză de prag sub care nu se produce nici un efect negativ; din păcate existența unui asemenea prag nu a fost demonstrată.

Anexa 1

Ecuatia lui Euler

Ecuatia lui Euler este ecuatia de miscare a fluidului ideal ce rezolva problema câmpului de viteze și presiune.

Se consideră un fluid aflat în mișcare.

Fluidul înconjurător acționează cu o forță de suprafață

$$dF_s = - \nabla p \, dx \, dy \, dz = - \nabla p \, dV \quad (1.1)$$

unde p este presiunea, V este volumul iar ∇ este operatorul :

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$$

Forța volumică se poate scrie :

$$dF_v = f \, dm = \rho \, f \, dx \, dy \, dz = \rho f \, dV \quad (1.2)$$

Forța rezultantă este atunci :

$$dF = (-\nabla p + \rho f) dV \quad (1.3)$$

Dar forța, conform legii a II-a dinamicii se scrie sub forma :

$$dF = adm = \frac{dv}{dt} \rho dV \quad (1.4)$$

Din (1.3) și (1.4) se obține

$$\rho \, dV \, \frac{dv}{dt} = (-\nabla p + \rho f) dV$$

sau

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + f \quad (1.5)$$

Ecuatia (1.5) este ecuatia lui Euler.

Anexa 2

Legea Navier-Stokes

Forța de frecare elementară, conform legii lui Newton (I.39) este de forma :

$$(dF)_x = -\eta d\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}\right) \cdot S = -\eta \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z}\right) dz \cdot S \quad (2.1)$$

Raportand la unitatea de masa, se obtine acceleratia suplimentara datorata acestei forte suplimentare:

$$f_z = \frac{(dF)_x}{dm} = \frac{1}{\rho S} \frac{(dF)}{dz} = -\frac{1}{\rho} \eta \frac{d^2 v_x}{dz^2} \quad (2.2)$$

sau

$$\frac{(dF)_x}{dm} = -\nu \frac{d^2 v_x}{dz^2} \quad (2.3)$$

Daca exista un gradient de viteza intr-o directie arbitrara, se obtine acceleratia indusa de vâscozitate :

$$\vec{a} = \vec{f}_r = -\nu \Delta \vec{v} \quad (2.4)$$

unde operatorul Δ este operatorul lui Laplace(laplacean) și are forma :

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.5)$$

Ecuatia de miscare pentru fluidul vâscos se obtine din ecuatia lui Euler(I.30) și va fi :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}_r + \nu \Delta \vec{v} \quad (2.6)$$

Ecuatia (2.6) este ecuatia Navier-Stokes

Anexa 3

Transformări de stare

a) Transformarea izotermă ($T = \text{const.}$), $U = \text{const.}$, $pV = \text{const.}$

Principiul I al termodinamicii se scrie :

$$\delta Q = pdV = \delta L \quad (3.1)$$

Lucrul mecanic produs în acest proces este :

$$L = \int_{V_1}^{V_2} pdV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{M} RT \frac{dV}{V} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3.2)$$

Reprezentarea grafică a transformării izoterme în coordonate Mendeleev – Clapeyron, este o hiperbolă echilaterală iar lucrul mecanic este porțiunea hașurată din Fig.3.1

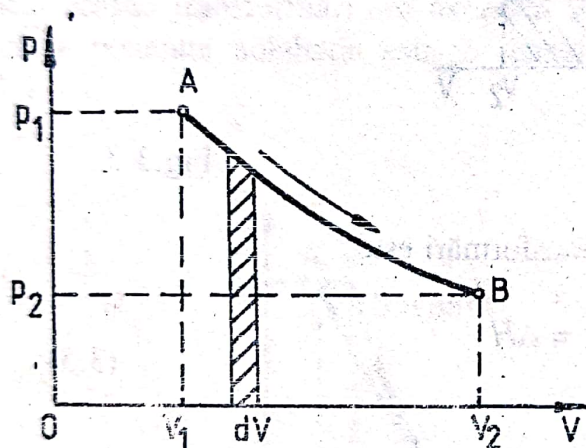


Fig.3.1.

b) Transformarea izocoră ($V = \text{const.}$, $\frac{p}{T} = \text{const.}$) $L = 0$,

deci principiul I al termodinamicii devine :

$$\delta Q = dU$$

Căldura schimbată în cadrul acestei transformări este :

$$\Delta Q = \int_{T_1}^{T_2} C_V dT = C_V (T_2 - T_1) \quad (3.3)$$

Graficul transformării izocore este prezentat în figura 3.2

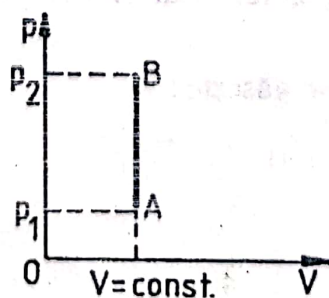


Fig.3.2

c) Transformarea izobară ($p = \text{const.}$, $\frac{V}{T} = \text{const.}$)

Lucrul mecanic produs în acest proces este :

$$L = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) \quad (3.4)$$

Reprezentarea grafică a transformării izoterme este dată în Fig.3.3 iar lucrul mecanic este porțiunea hașurată din Fig.3.3

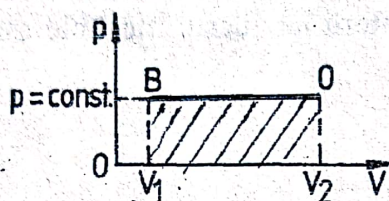


Fig.3.3

Căldura schimbată în cadrul acestei transformări este :

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta L = \Delta(U + pV) = \Delta H \quad (3.5)$$

În expresia (3.5) H este entalpia.

d) Transformarea adiabatică

Transformarea adiabatică este transformarea fără schimb de căldură cu exteriorul ($\delta Q = 0$)

Ecuatia principiului I al termodinamicii devine :

$$dU + p dV = 0 \quad (3.6)$$

Dar pentru un mol de gaz,

$$dU = C_v dT \quad (3.7)$$

și înlocuind în (3.6), pentru un mol de gaz se obține

$$C_v dT + p dV = 0 \quad (3.8)$$

Diferențiind ecuația de stare a gazului ideal avem :

$$p dV + V dp = R dT \quad (3.9)$$

Înlocuind dT din (3.9) în (3.6) se găsește :

$$\left(\frac{C_v}{R} + 1\right) p dV + \frac{C_v}{R} V dp = 0 \quad (3.10)$$

Notând exponentul adiabetic cu :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (3.11)$$

relația (3.10) se scrie :

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0 \quad (3.12)$$

Integrând (3.12) se obține :

$$\gamma \ln V + \ln p = \text{const} \quad (3.13)$$

adică $pV^\gamma = \text{const}$

$$(3.14)$$

Expresia (3.14) este **ecuația adiabatei**.

În funcție de temperatură și volum ecuația acestei transformări este :

$$TV^{\gamma-1} = \text{const} \quad (3.15)$$

Graficul acestei transformări are aspectul izotermei dar având panta mai mare, întrucât exponentul adiabatic este o mărime supraunitară și este prezentat în Fig.3.4

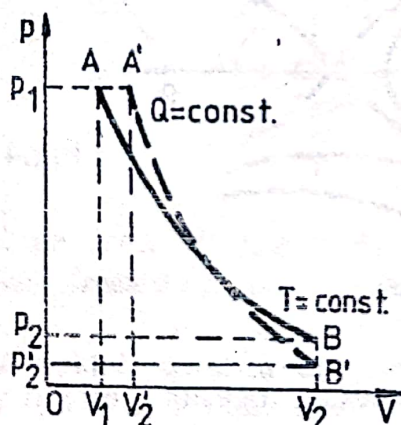


Fig.3.4

Lucrul mecanic este suprafața hașurată și are expresia :

$$L = - \int dU = - \int_{T_1}^{T_2} C_v dT = C_v (T_1 - T_2) \quad (3.16)$$

Tinând cont de relația lui Mayer lucrul mecanic se mai poate scrie :

$$L = \frac{R}{\gamma - 1} (T_1 - T_2) \quad (3.17)$$

Anexa 4

Ireversibilitatea proceselor mecanice

Pentru a pune în evidență ireversibilitatea proceselor mecanice și apoi a celor termodinamice, să considerăm câteva exemple foarte cunoscute din mecanică. Fie un pendul gravitațional fără frecare, a cărui ecuație de mișcare este de forma :

$$M l \ddot{\theta} + M g \sin \theta = 0,$$

Aici M este masa pendulului, l este lungimea lui, θ este unghiul de deviere de la poziția inițială iar g este accelerația gravitațională.

În coordonate θ și $\dot{\theta}$, mișcarea pendulului se reprezintă în spațiul fazelor sub forma dată în Fig .4.1 pentru diferite condiții inițiale. (Fiecare condiție inițială corespunde unei energii a pendulului).

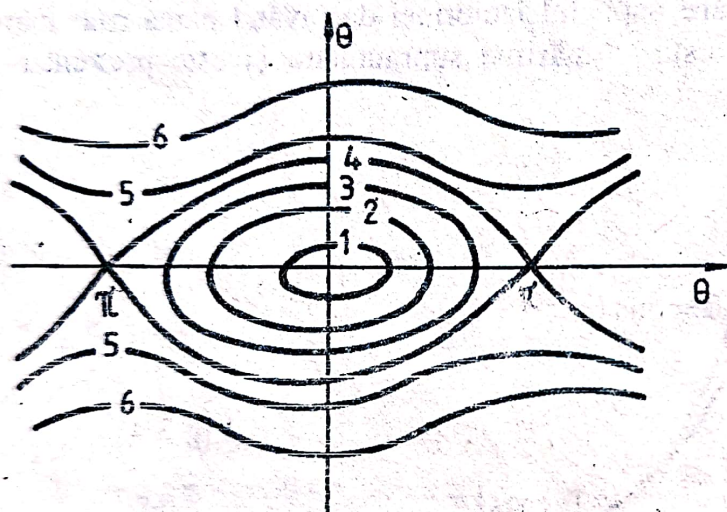


Fig.4.1

Mișcarea corespunzătoare acestor traiectorii este o mișcare periodică. Dacă oprim pendulul într-o anumită poziție și îi imprimăm o viteză egală, dar de sens contrar, pendulul se va mișca pe aceeași traiectorie, dar de sens contrar.

Mișcarea pendulului va continua la nesfârșit ca și mișcarea astrilor în univers. **“Viitorul și trecutul pentru acest sistem are același rol, adică nici unul”.** (Prigogine , Stengers).

Dacă însă pendulul are frecare, ecuația de mișcare este :

$$M l \ddot{\theta} + \gamma l \dot{\theta} + M g l \sin \theta = 0$$

Trajectoriile în spațiul fazelor pentru $M = 1$, $l = 1$, $\gamma \neq 0$ sunt date în Fig.4.2. Se observă că diferitele traiectorii se apropie de același punct care corespunde stării staționare ($\theta = 0$, și $\dot{\theta} = 0$).

Acest punct se numește atractor.

O proprietate a sistemelor disipative (a sistemelor deschise care schimbă energie și substanță cu mediul exterior) este aceea că diferitele traiectorii în spațiul fazelor sunt atrase către o regiune avînd dimensiunea mai mică.

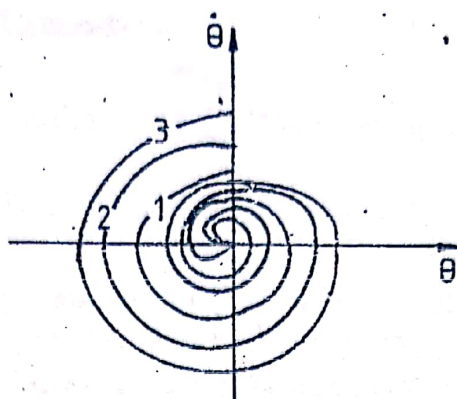


Fig.4.2

Alte sisteme disipative tind către o comportare periodică, ceea ce corespunde în spațiul fazelor, unei curbe închise numită **ciclu limită** (Fig.4.3)

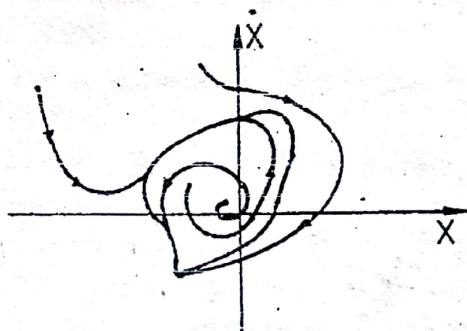


Fig.4.3

Un exemplu de acest fel este ceasul cu pendul care-și compensează pierderile, datorate frecărilor, prin acțiunea unui resort sau a unei contragreutăți.

Inima viețuitoarelor este și ea un exemplu de astfel de oscilator.

Importanța ciclului limită derivă din aceea că sistemul evoluează către aceeași traiectorie, indiferent de condițiile inițiale.

Sistemul uită condițiile inițiale de la care pleacă.

Aceasta este caracteristica de bază a sistemelor disipative. Din orice stare ar porni, sistemul ajunge la o comportare periodică, comportare care depinde de structura sistemului, de modul cum acesta interacționează cu mediul exterior.

Indiferent de perturbațiile care apar, el se va autoorganiza tinzând spre ciclul limită.

Un sistem poate avea mai mulți atractori. Condițiile inițiale pot conduce la evoluția sistemului către atractori diferiți. În ultimele decenii au fost puși în evidență și atractori **stranii**. În acest caz sistemele disipative pleacă din puncte foarte apropiate dar se depărtează exponențial în timp. Traiectoriile rămân finite în spațiul fazelor, dar nu se închid niciodată. O asemenea comportare se numește **haotică**. Astfel, deși aceste sisteme sunt deterministe, ele pot avea comportări întâmplătoare.

Trebuie să admitem că și comportarea haotică este o comportare naturală.

BIBLIOGRAFIE

1. Agre, P., Dekker M., **Red blood cell membranes**. New York and Basel, (1989).
2. Baran. T., **Biofizica medicală**, Institutul de medicină și farmacie Iași, , Iași (1985)
3. Beier W., **Biophysik**, Veb Georg Thieme , leipzig, (1968)
4. Belanovski, **Osnovi biofiziki v veterinarii**, Moskva, (1989).
5. Bourceanu G., Grosu I., Beldie Camelia, **Evoluție și autoorganizare în sisteme departe de echilibru**, Editura tehnică, București, (1989).
6. Condurache D., Badescu Rodica, Grecu Irinel, Oancea Servilia **Fizica clasică în 15 lecții**, Univ. Tehnică "Gh. Asachi" Iași,, Iași , (1994)
7. Crețu T., Tudorache S., **Fizica atomului** , Ed. științifică și enciclopedică, București, (1985).
8. Dragomirescu Elena, Enache L., **Biofizică**, Editura didactică și pedagogică, București, (1993).
9. Gunther K., Schultz W., **Biophysical Theory of Radiation Action**, Akademie, Verlag, Berlin, 1983
10. Flonta Maria Luiza, Mărgineanu D.-G., Movileanu L., **Biofizica**, Partea I, Universitatea București, Facultatea de Biologie, București, (1992).
11. Gașpar E., Serban D., **Elemente de radioprotecție**, Ed. Tehnică, București, (1976).
12. Gheorghe V., Popescu A., **Introducere în bionică**, Editura științifică, București (1990).
13. Isac M., Filipescu C., Isac Rodica Maria, **Biofizica De la Big-Bang la Ecosisteme**, Ed. Tehnică, București, (1996),
14. Luca, E. Zet, Gh., ș.a., **Fizica generală**, Editura Didactică și Pedagogică,, București, (1981)
15. Mărgineanu D.G., **Energetica lumii vii**, casa de editură Edimpex-Speranța, București, (1992).
16. Margineanu D.-G., Isac M.I., Tarba C., **Biofizica**, Editura didactică și pedagogică, București, (1980)
17. Nave C.R., Nave B. C., **Physics for the health sciences**, W.B. Saunders Company, Philadelphia, London, Toronto, Mexico City, Rio de Janeiro, Sydney, Tokio, (1985).
18. Nicula A., **Rezonanța magnetică**, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980
19. Oancea, Servilia , Condurache D., Badescu Rodica, Grecu Irinel, **Fizica cuantica în 15 lecții**, Univ Tehnică "Gh. Asachi" Iași,, Iași , (1998)
20. Oancea Servilia, Foca N., Condurache D., Băleanu, **Atomi. Molecule. Stări de agregare**, Edit DAN, Iași, (1999).

- 15 a
21. Pauling L., **The Nature of the Chemical Bond**, Cornell University Press, (1960).
 22. Popescu A., **Fundamentele biofizicii medicale**, Vol. I., Editura All, București, (1994).
 23. Rusu F., Matei Varvara, **Biofizica**, Institutul Agronomic "Ion Ionescu de la Brad", Iași, (1988).
 24. Rusu V., Baran T., Brănișteanu D.D., **Biomembrane și patologie**, Editura medicală, Vol. I, București, (1988).
 25. Rubin A.B., **Biofizika**, Moskva, (1987).
 26. Sybesma Ch., **Biophysics-An Introduction**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, (1989)
 27. Volkenstein M., **Biophysique**, Ed., MIR Moscou, (1985)

- Vine omul, stă oleacă,
Mai discută dar și pleacă
- Gine-i habnic și muncete
Are tot ce vrea
Gine stă și lenește
Are tot aia

ISBN 973-8048-05-2

